

Короткоцикловое отделение от He и рециркуляция D/T с помощью сверхпроницаемых мембран в установках УТС

А.И. Лившиц
СПбГУТ

Открытый научный семинар
«Управляемый термоядерный синтез и плазменные технологии»
27 июня 2024, Москва



Содержание

- Базовые представления о сверхпроницаемых мембранах (СПМ) и их применении в установках УТС
- Прогресс СПМ-технологии по результатам законченного проекта.
- Эффекты вязкостного режима и откачка Не
- Планы на будущее

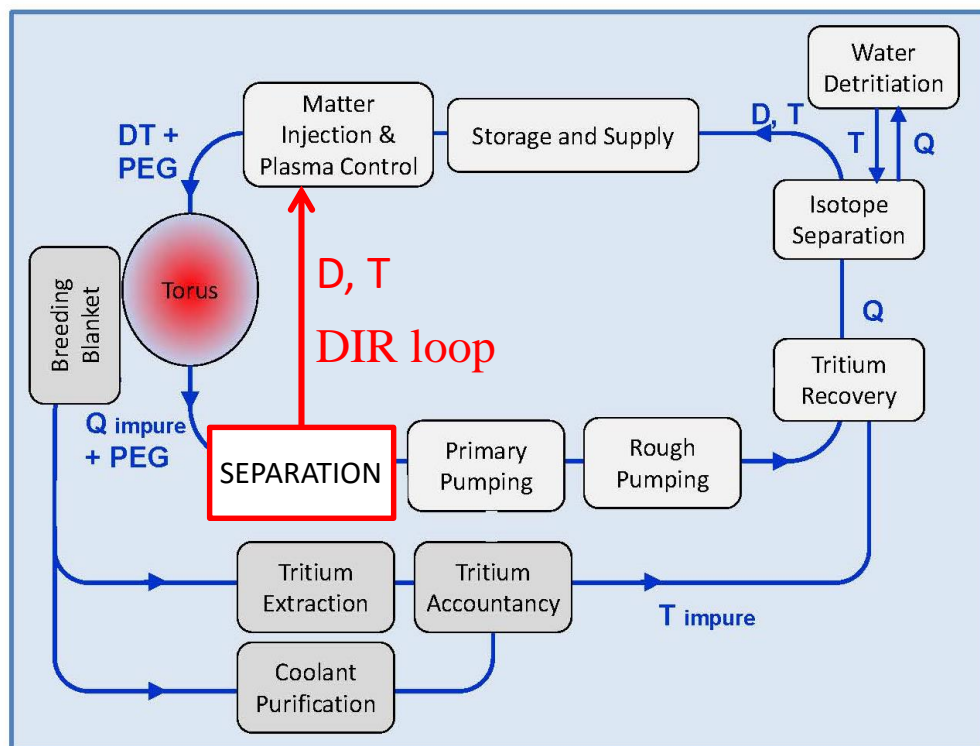
Зачем нужна короткоцикловая рециркуляция D/T?

Концентрация He не должна превосходить 5% в термоядерной плазме.



Газовая смесь, непрерывно выводимая из рабочей плазмы через дивертор, содержит лишь 5% He, тогда как остальные 95% - это D/T (!!).

Решение по рециркуляции D/T, принятое для ИТЕРа, признаётся его разработчиками неприемлемым для пост-ИТЕРовских установок, где расход D/T существенно выше.



Предлагаемое решение

Прямой внутренний рециклинг

D/T с помощью мембран,

сверхпроницаемых для

надтепловых водородных

частиц, но непроницаемых

для любых неводородных

частиц, включая He.

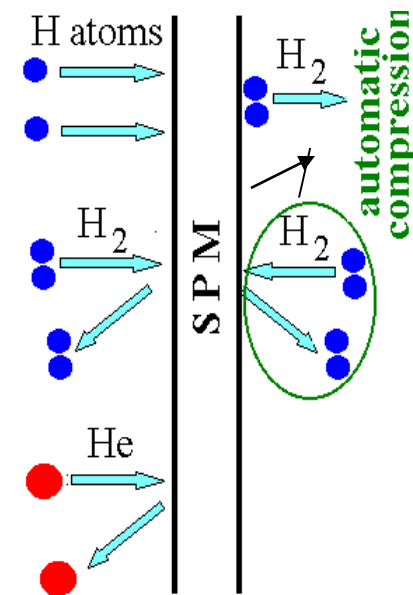
Что такое сверхпроницаемость и сверхпроницаемые мембраны (СПМ) ?

Металлические мембраны макроскопической толщины могут быть сверхпроницаемы для водородных частиц, если их энергия (кинетическая, химическая или внутренняя) превышает ~ 1 eV. Это означает, что практически **весь падающий поток надтепловых водородных частиц** проходит сквозь мембрану независимо от её толщины и температуры. Другими словами проницаемость металлической мембраны приближается к мыслимому пределу – проницаемости отверстия в тонкой стенке той же площади.

В частности, сверхпроницаемость имеет место для тепловых атомов водорода, имеющих избыток химической энергии (22 эВ).

СПМ практически непроницаемы для любых других газов, включая He, а также для обычных тепловых молекул водорода (H_2 , D_2 , T_2).

СПМ способны автоматически сжимать проникающий водород на порядки величины.



Физическая идея сверхпроницаемости

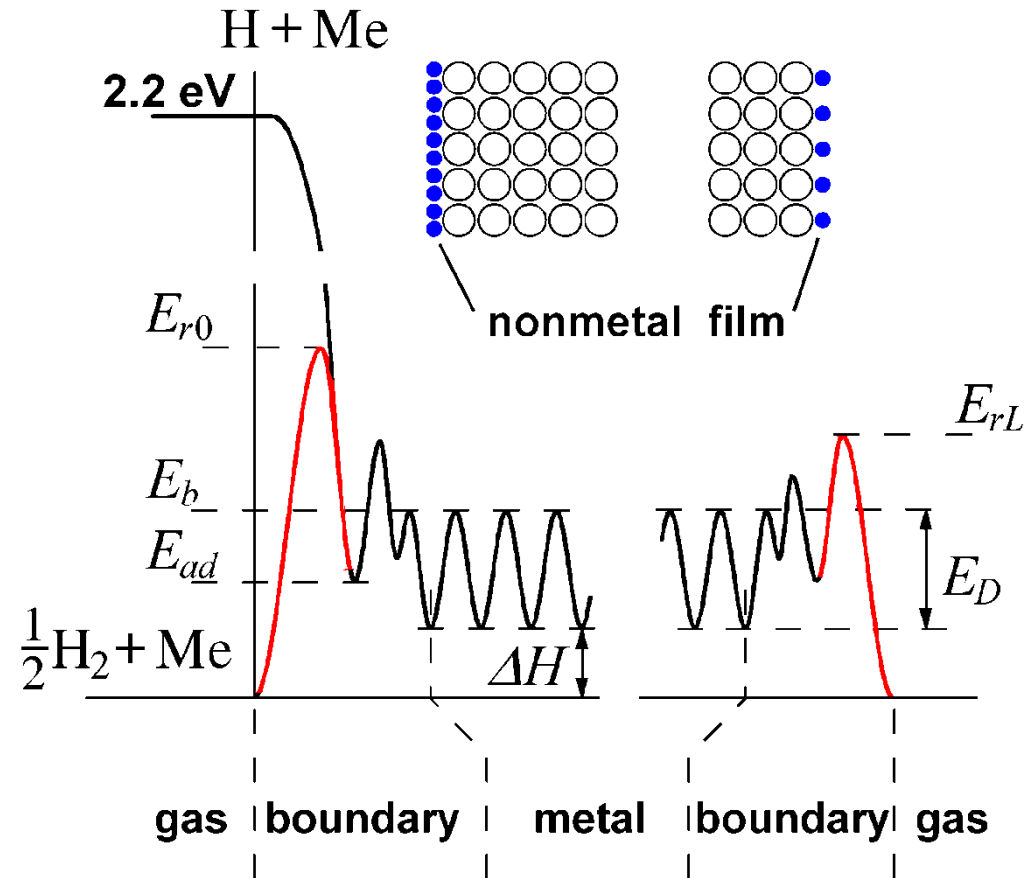
Необходимые условия СП:

1. Достаточно высокий барьер E_{r0} .
2. Энергия частиц газа > 1 эВ.
3. Благоприятная симметрия: $E_{r0} > E_{rL}$.

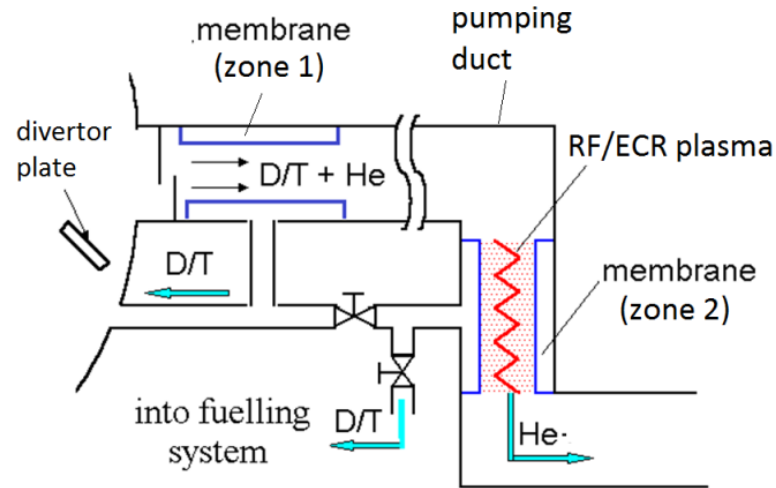
Автоматическая компрессия и очистка

Барьер отвечает за все основные свойства СПМ: максимальные поток, компрессию, толщину, рабочую температуру.

Причина барьера – монослойные неметаллические плёнки чрезвычайно стабильные термически и химически.



Идея прямого внутреннего рециклинга с помощью СПМ



2023

Experimental Progress in the Development of a Metal Foil Pump for DEMO

Yannick Kathage^{1,*}, Alejandro Vazquez Cortes¹, Stefan Merli², Christian Day¹, Thomas Giegerich¹, Stefan Hanke¹, Juri Igitkhanov¹

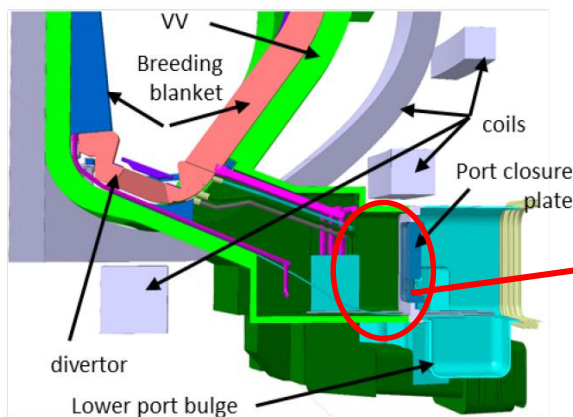


Fig. 2: Simplified illustration of the lower port with main components

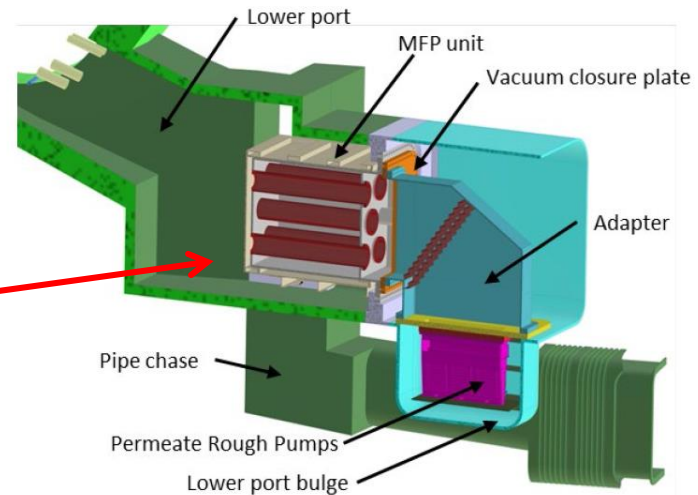
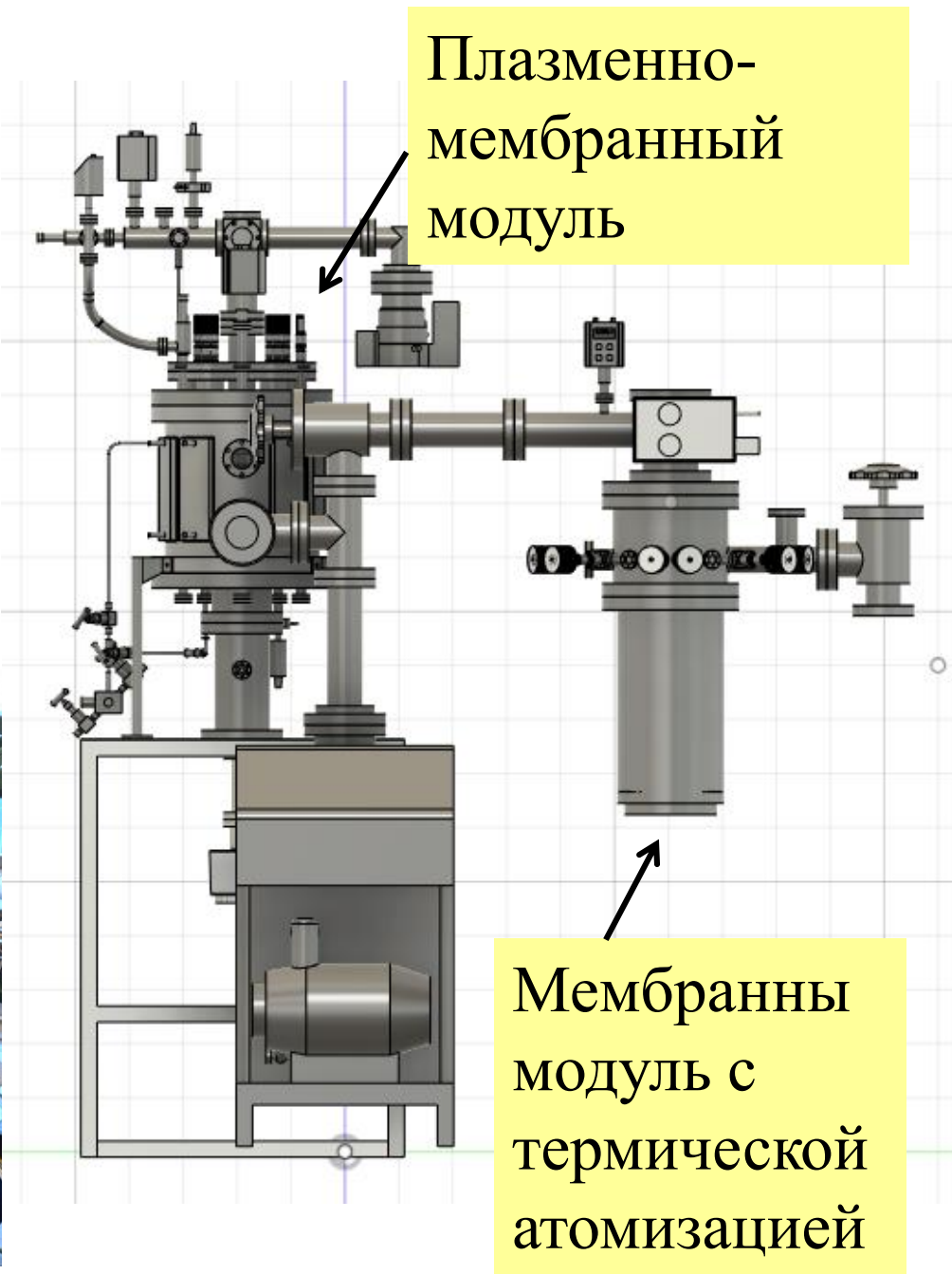
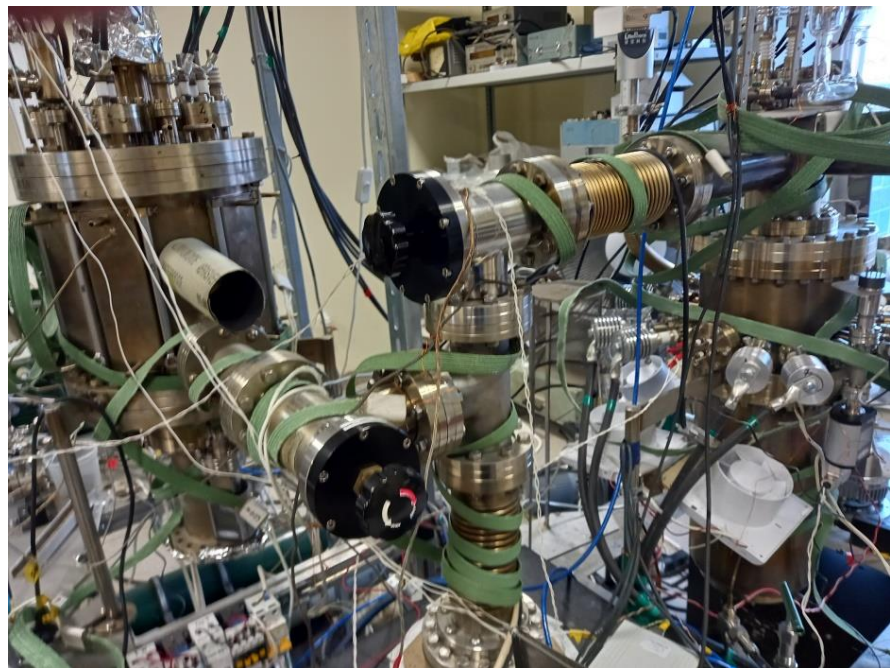
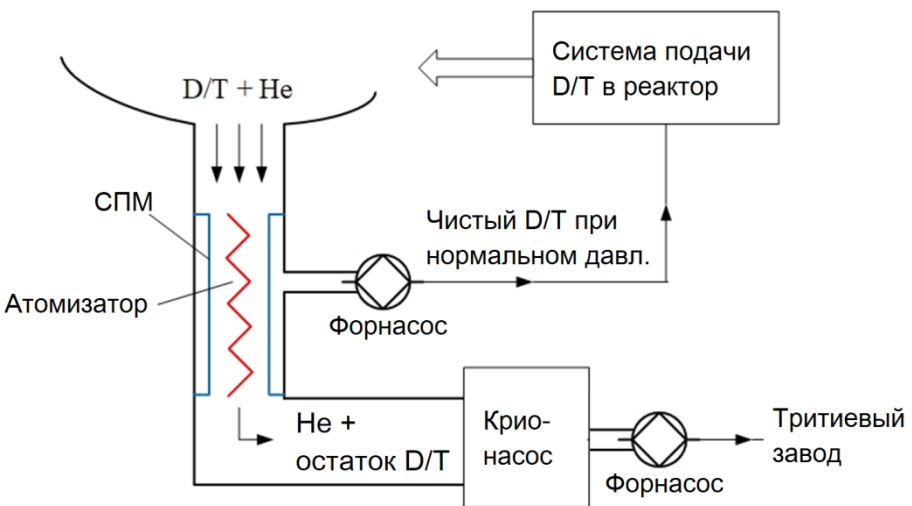
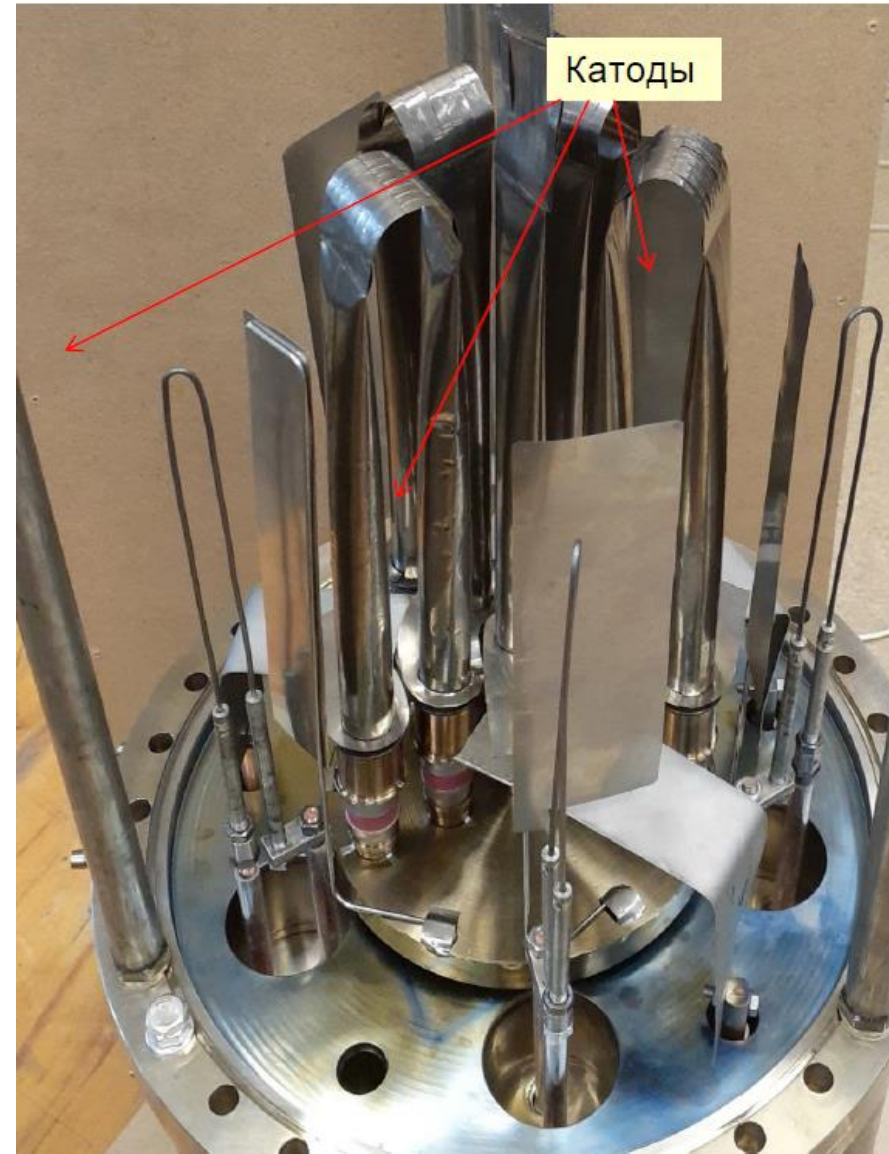
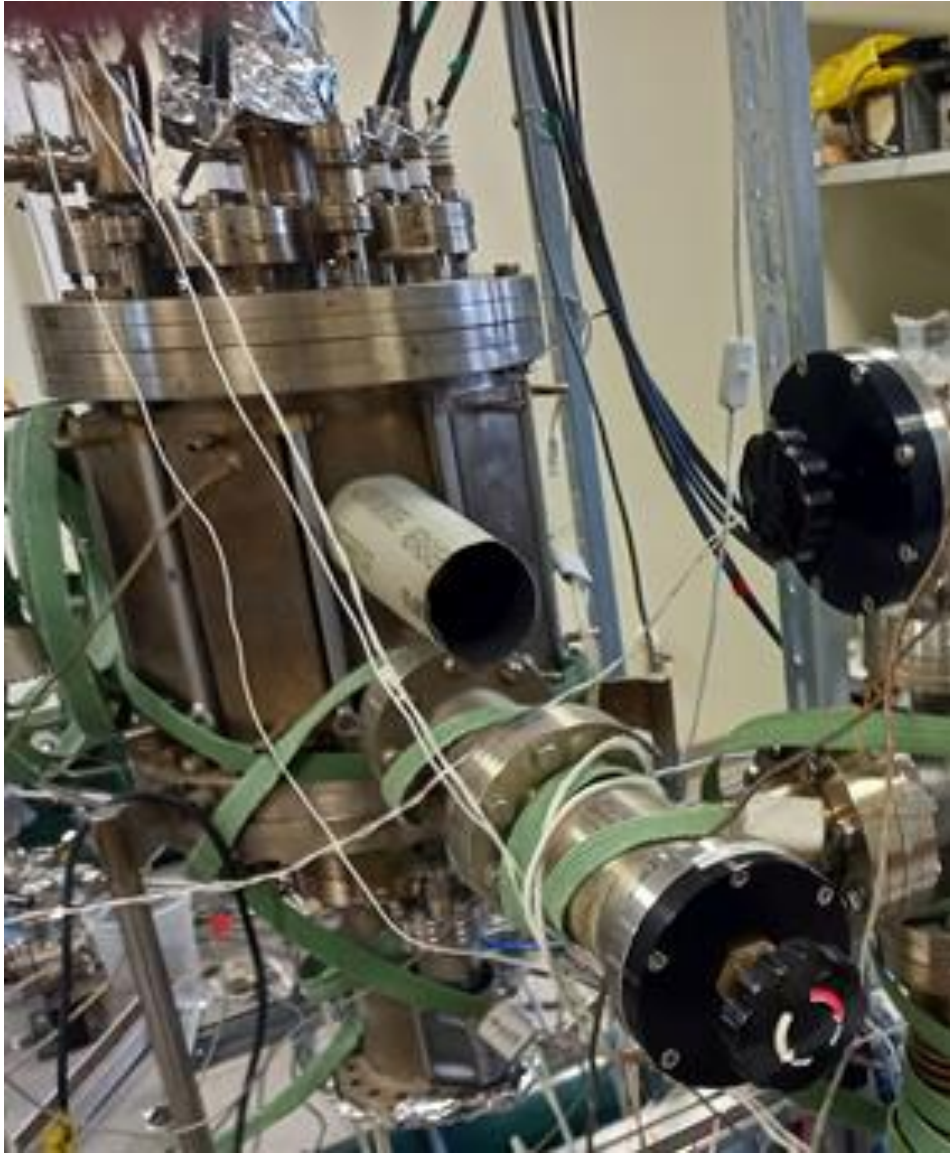


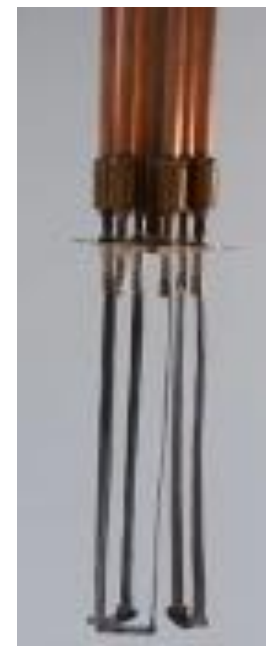
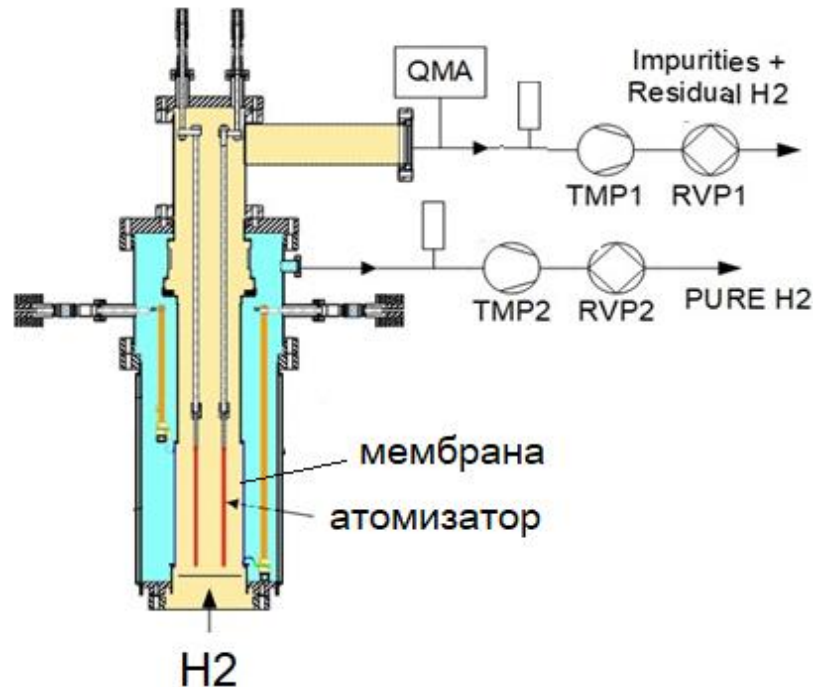
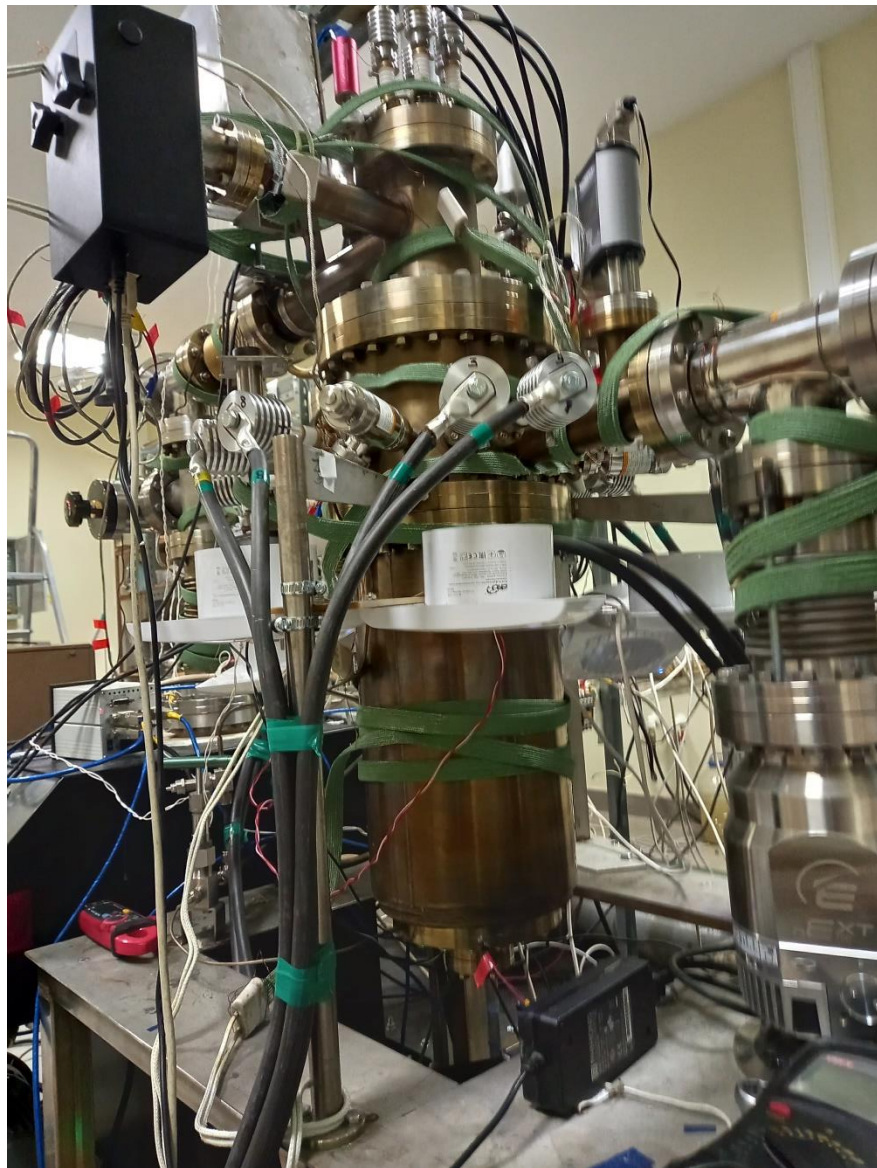
Fig. 9: Proposed setup of the MFP inside the lower port



ПЛАЗМЕННО-МЕМБРАННЫЙ МОДУЛЬ



Мембранный модуль с термической атомизацией

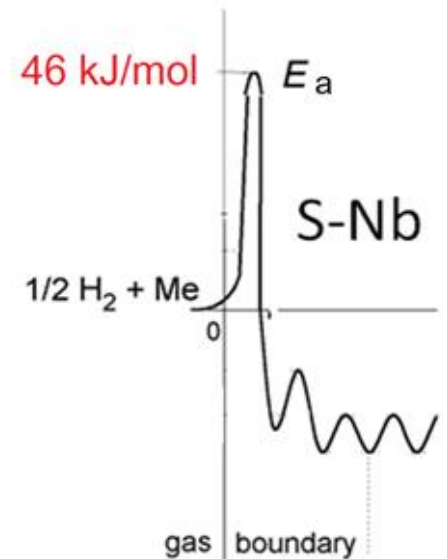
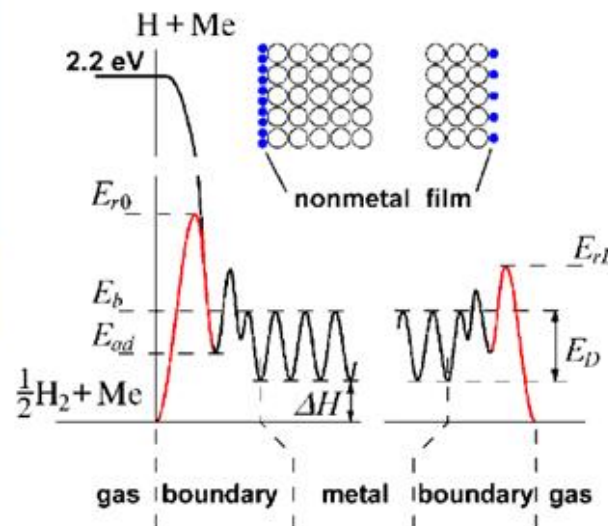


Прямонакальный
нагрев СПМ
технически значимого
размера -
нетривиальная задача,
решённая впервые



Возможность чистого высокотемпературного нагрева – позволяет получить/восстановить, требуемое состояние поверхности, в первую очередь, требуемый барьер.

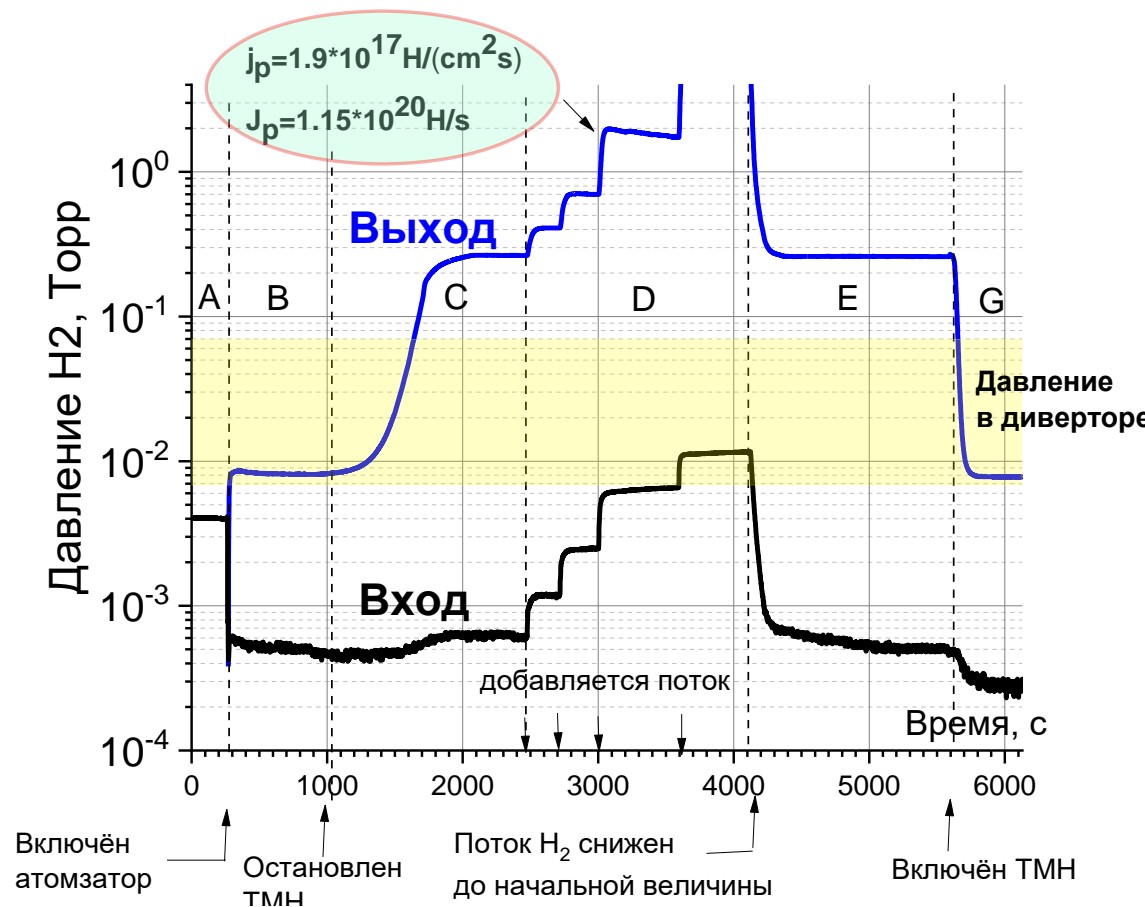
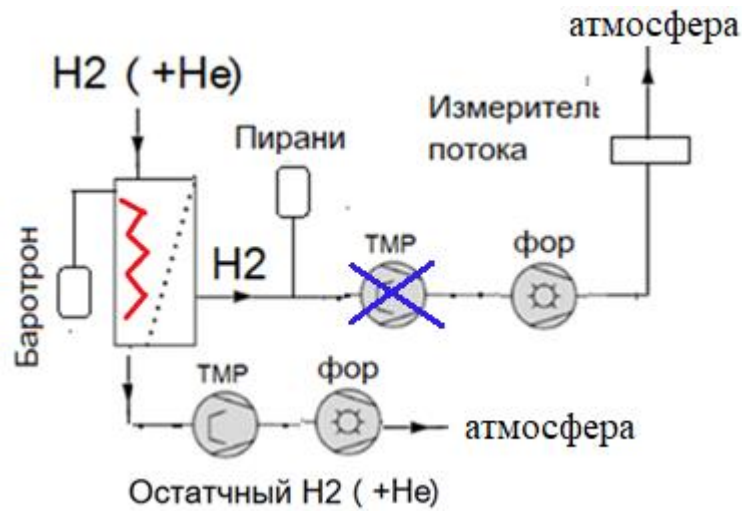
Благодаря высокотемпературному нагреву, осуществлена сульфуризация поверхности СПМ, позволившая достигнуть требуемых параметров.





Модуль Б
СУПМЕМ-1М

Модуль А
СУПМЕМ-1



ПРОДЕМОНСТРИРОВАНО

- работа в релевантном диапазоне давлений: 0.1-1.0 Па
- требуемая удельная производительность: $\approx 2 \cdot 10^{21} \text{H}/(\text{m}^2 \text{s})$
- технически значимый масштаб производительности модели: $\approx 10^{20} \text{H}/\text{s}$
- высокая эффективность использования атомов: не менее 88% атомов, произведённых атомизатором проникает через мембрану,
- компрессия до нормального давления – в одну ступень фор.насосом
- 100%-ная селективность

Характеристики модели СПМ-насоса с термической атомизацией

Удельная производительность при давлении 1 Па и степени компрессии 300	$1 \cdot 10^{21} \text{ H}_2/(\text{м}^2\text{с})$
Полная производительность при давлении 1 Па и степени компрессии 300	$510^{19} \text{ H}_2/\text{с}$
Селективность по водороду	100%
Компрессия откачанного СПМ водорода до нормального давления	Форвакуумным насосом (в одну стадию)
Материал мембраны	Ниобий
Способ генерации атомов	Термическая диссоциация молекул
Материал атомизатора	Тантал
Номинальная температура атомизатора	2080 °К

Откачка Не с помощью СПМ.

Эффекты вязкостного режима.

ТРТ

$P_{\Sigma} = 3 \text{ Па}$

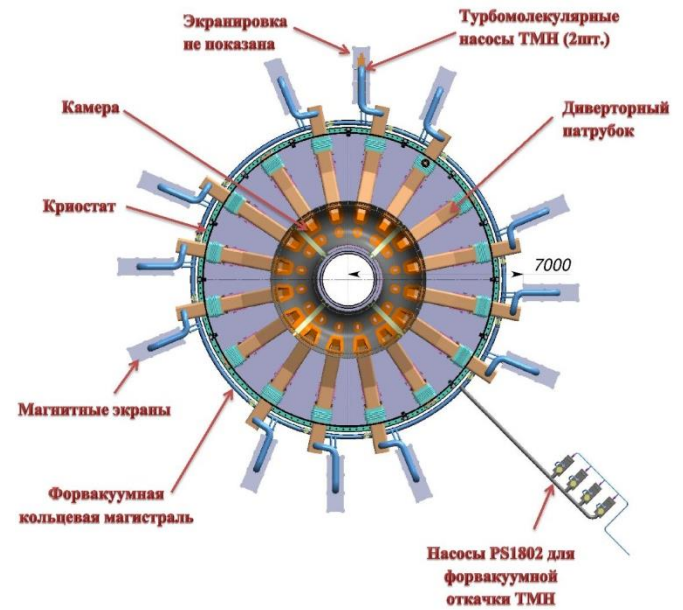
95%D2+5%He

12 линий откачки

$$J_{D2} = \frac{1}{12} \cdot 7.5 \cdot 10^{21} D_2 / c$$

Отделение 90% D2

Д.А. Карпов и др. Физика
плазмы, 2021



ТРТ

$P_{\Sigma} = 3 \text{ Па}$

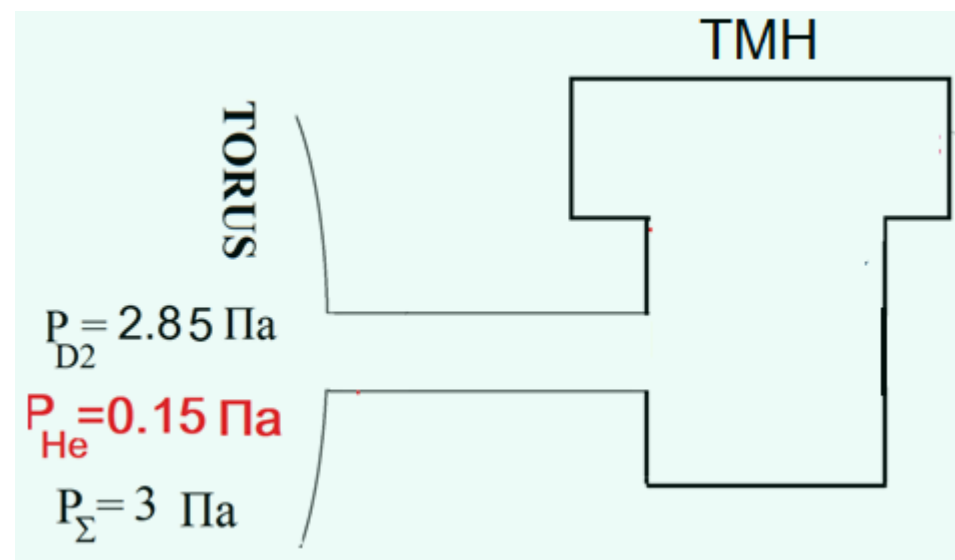
95%D2+5%He

12 линий откачки

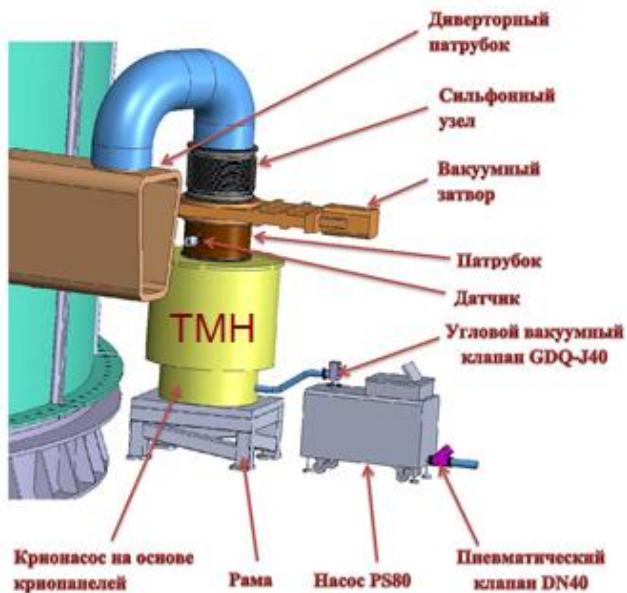
$$J_{D2} = \frac{1}{12} \cdot 7.5 \cdot 10^{21} D_2 / c$$

Отделение 90% D2

Д.А. Карпов и др. Физика
плазмы, 2021



Базовый вариант откачки через одну из 12-ти линий с помощью ТМН.



ТРТ

$P_{\Sigma} = 3 \text{ Па}$

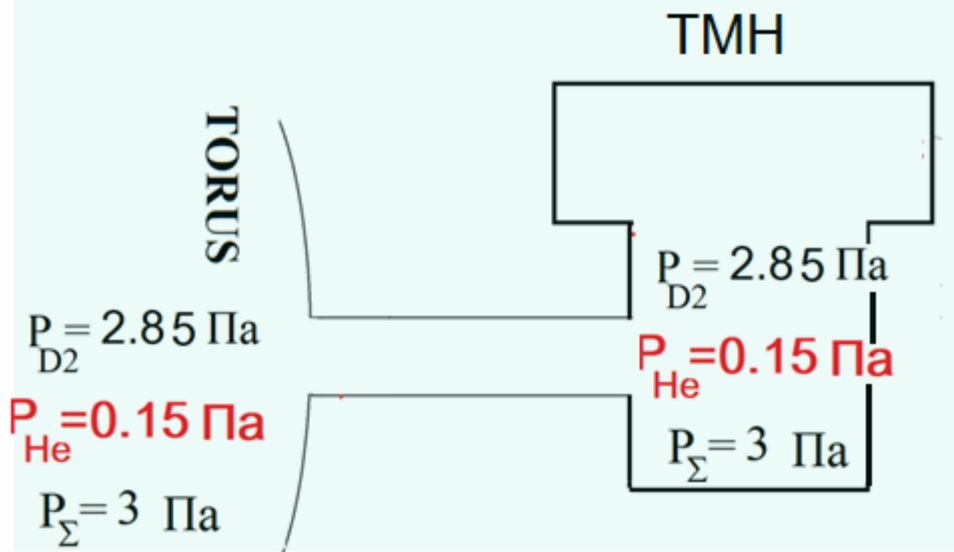
95%D2+5%He

12 линий откачки

$$J_{D2} = \frac{1}{12} \cdot 7.5 \cdot 10^{21} D_2 / c$$

Отделение 90% D2

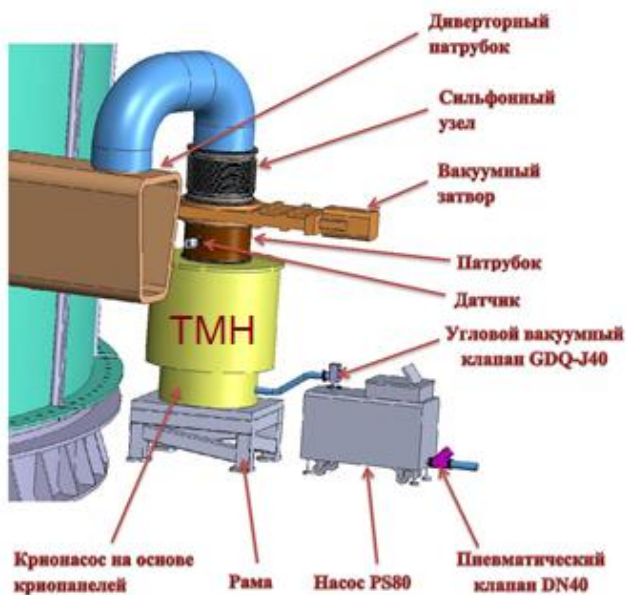
Д.А. Карпов и др. Физика
плазмы, 2021



Считаем, что проводимость откачной
линии не лимитирует откачку.



Практически нет перепада ни полного, ни
парциальных давлений D/T и He .



ТРТ

$$P_{\Sigma} = 3 \text{ Па}$$

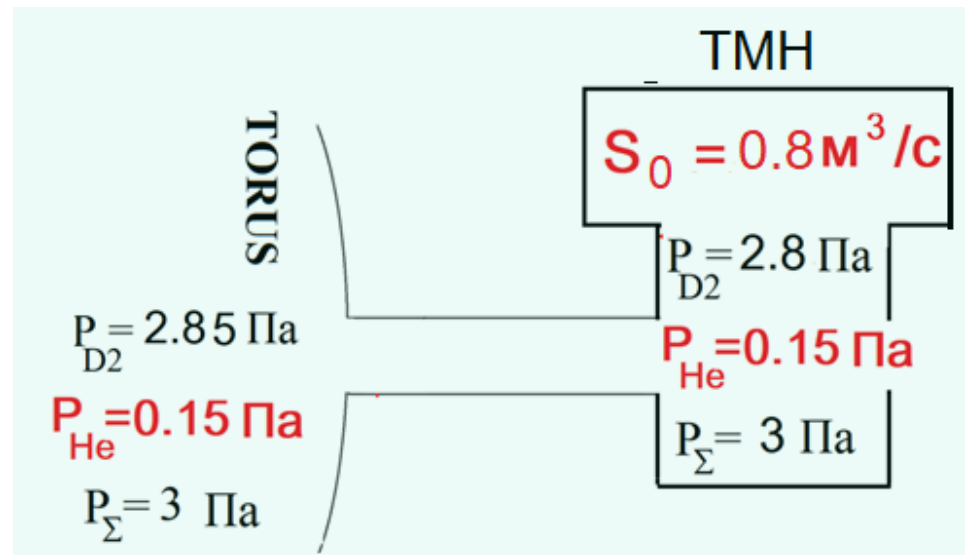
95%D2+5%He

12 линий откачки

$$J_{D2} = \frac{1}{12} \cdot 7.5 \cdot 10^{21} D_2 / c$$

Отделение 90% D2

Д.А. Карпов и др. Физика
плазмы, 2021



Требуемая при данных потоке и давлении скорость откачки $S_0 = 0.8 \text{ м}^3/\text{с}$



TPT

$P_{\Sigma} = 3 \text{ Па}$

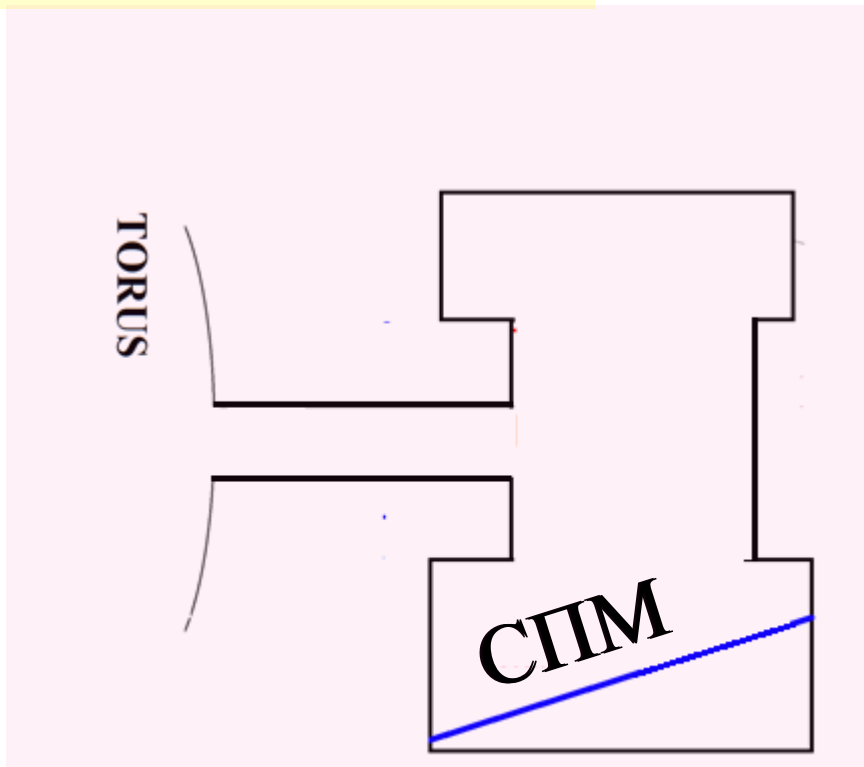
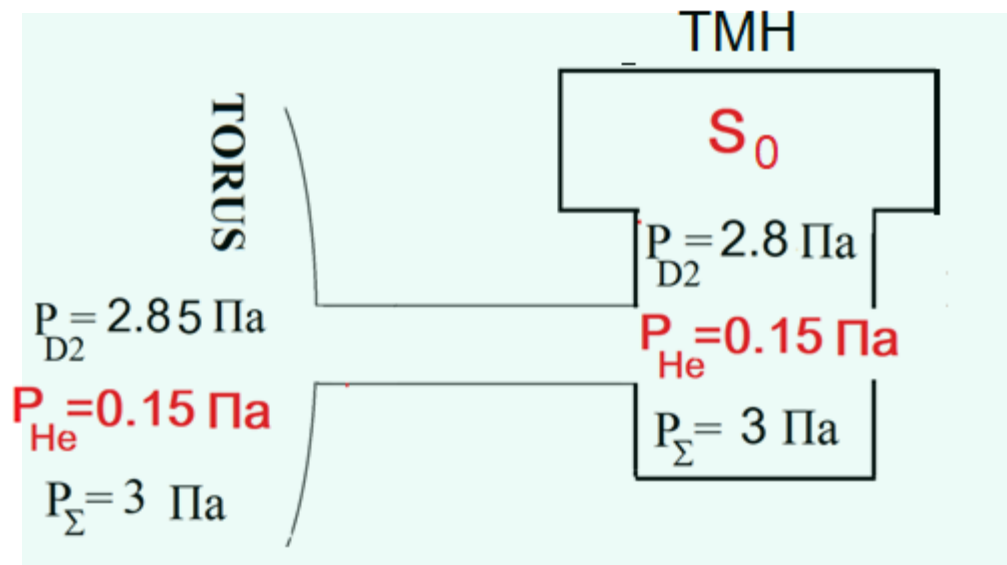
95%D2+5%He

12 линий откачки

$$J_{D2} = \frac{1}{12} \cdot 7.5 \cdot 10^{21} D_2 / c$$

Отделение 90% D2

Д.А. Карпов и др. Физика
плазмы, 2021



Можно рассматривать два
подхода к решению
поставленной задачи с
помощью СПМ.

ТРТ

$$P_{\Sigma} = 3 \text{ Па}$$

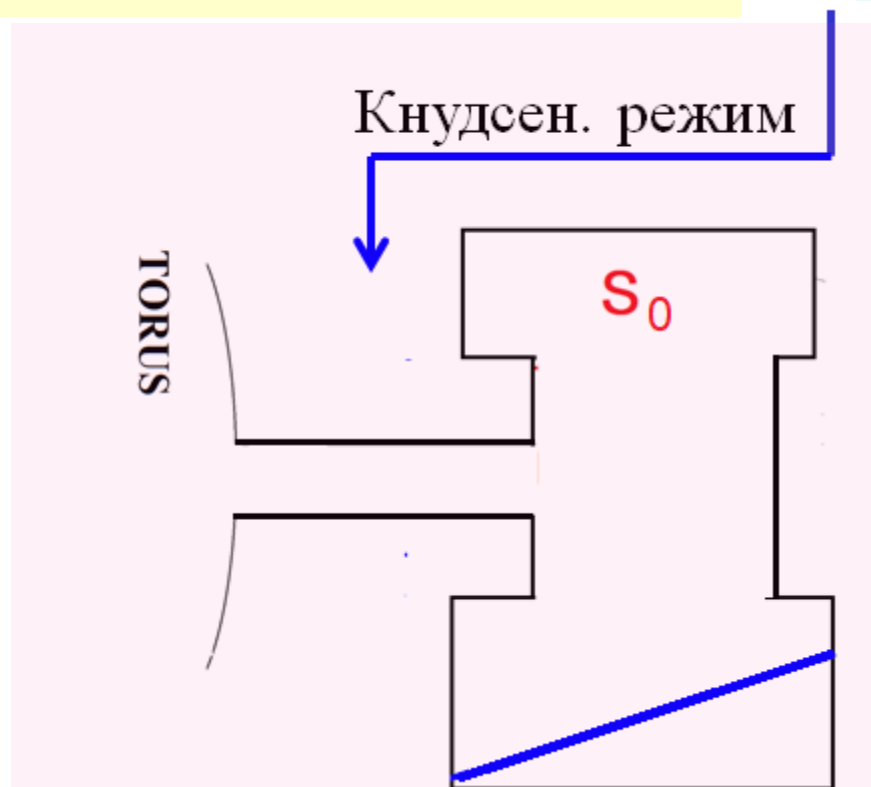
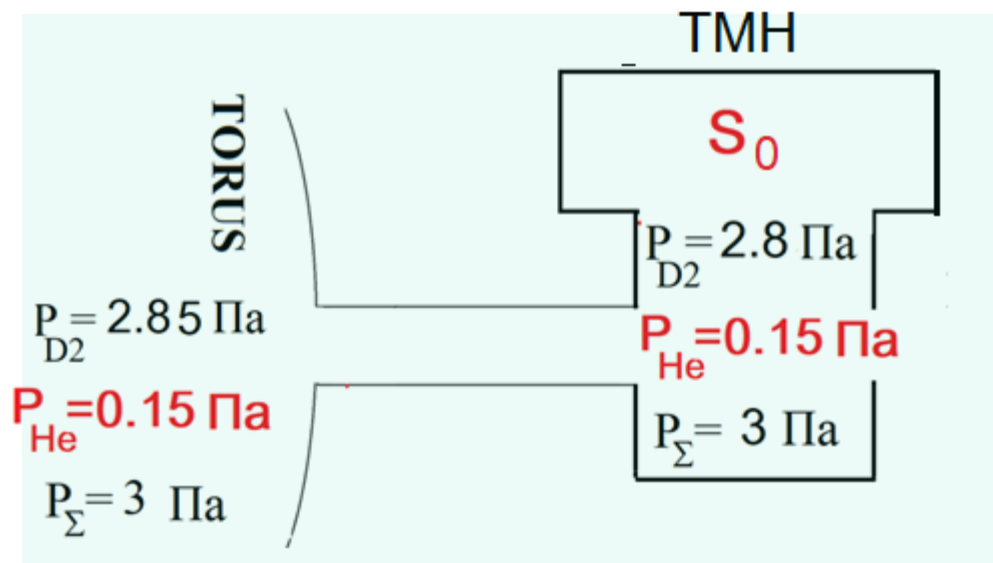
95%D2+5%He

12 линий откачки

$$J_{D2} = \frac{1}{12} \cdot 7.5 \cdot 10^{21} D_2 / c$$

Отделение 90% D2

Д.А. Карпов и др. Физика
плазмы, 2021



1. Исходим из того, что необходимо откачивать заданный поток He при его заданном парциальном давлении в диверторе



Скорость откачки ТМН остаётся без изменения.

TPT

$$P_{\Sigma} = 3 \text{ Па}$$

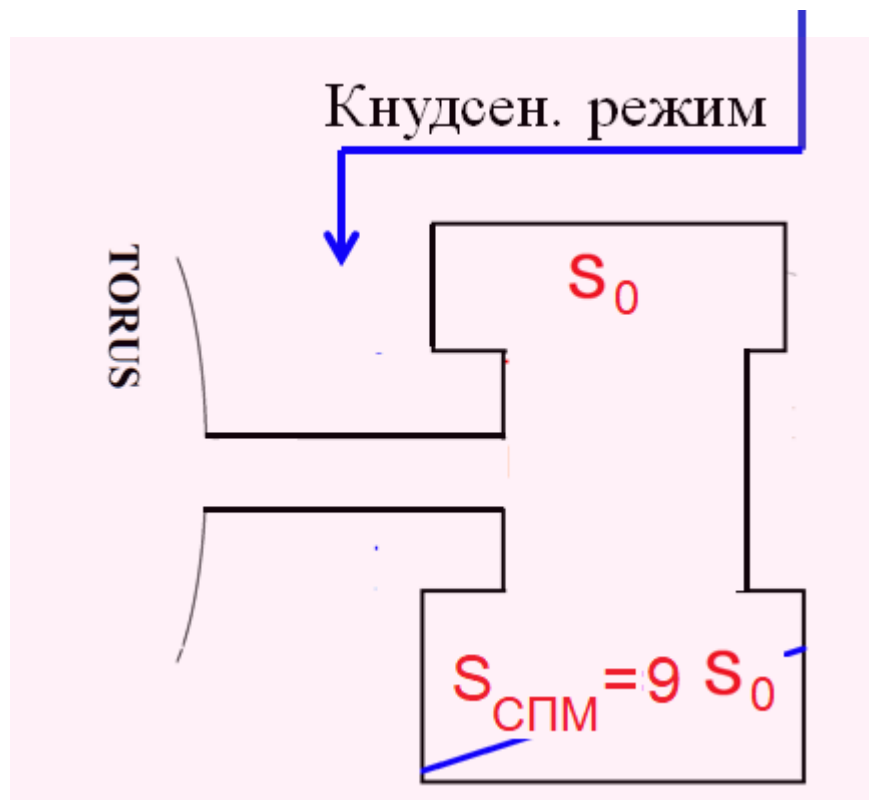
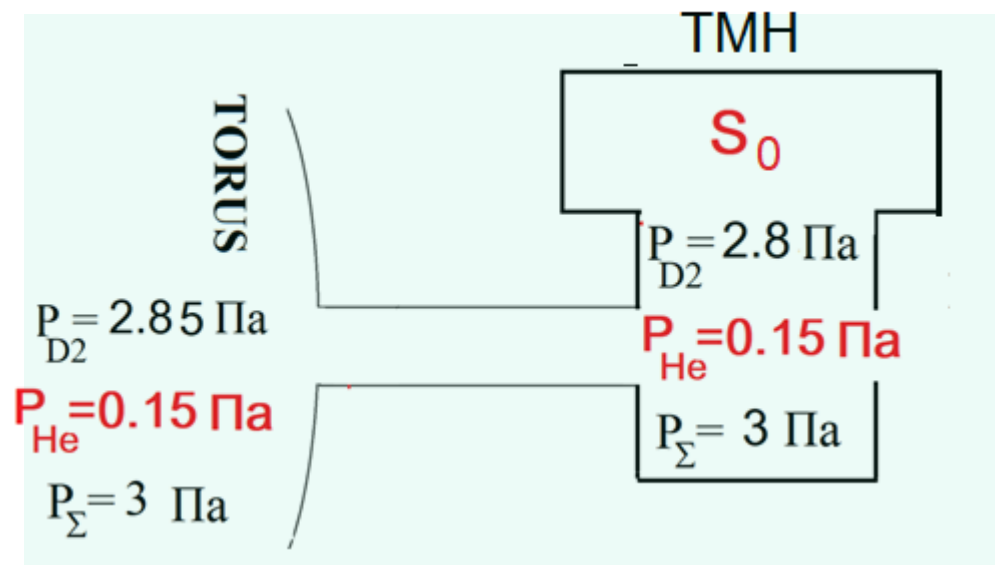
95%D2+5%He

12 линий откачки

$$J_{D2} = \frac{1}{12} \cdot 7.5 \cdot 10^{21} D_2 / c$$

Отделение 90% D2

Д.А. Карпов и др. Физика
плазмы, 2021



Но с этой скоростью ТМН
откачивает также и D2.



Скорость откачки СПМ должна
быть в 9 раз выше

TPT

$$P_{\Sigma} = 3 \text{ Па}$$

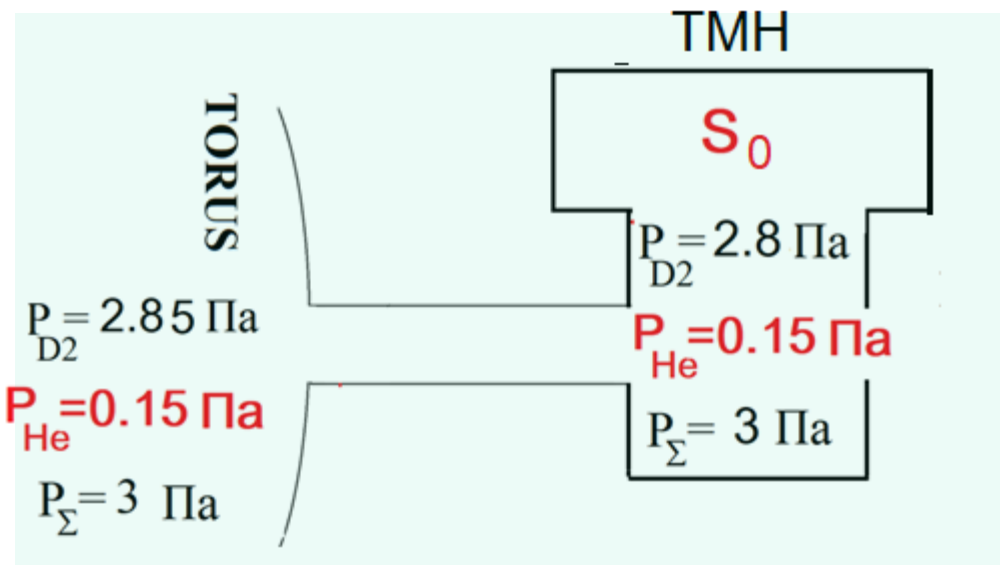
95%D2+5%He

12 линий откачки

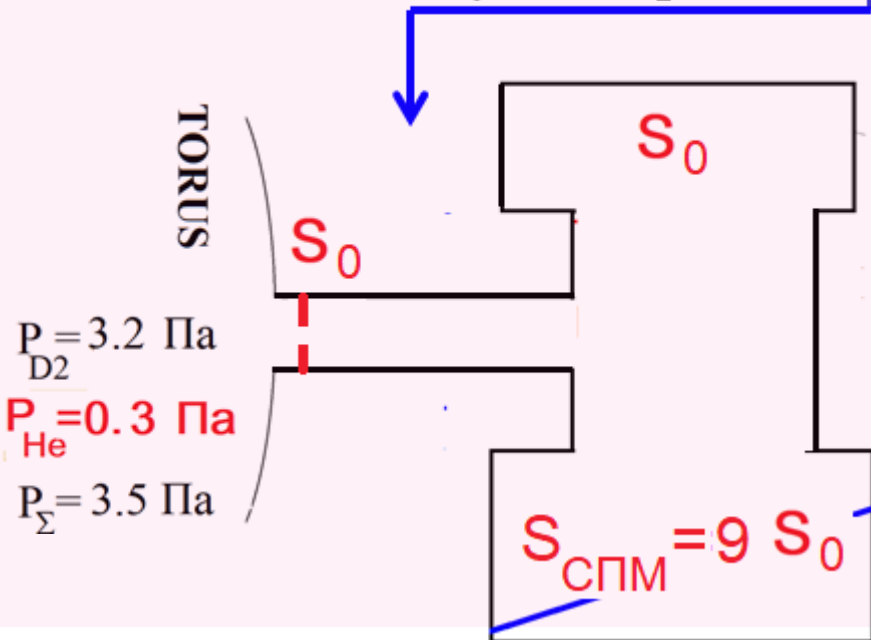
$$J_{D2} = \frac{1}{12} \cdot 7.5 \cdot 10^{21} D_2 / c$$

Отделение 90% D2

Д.А. Карпов и др. Физика плазмы, 2021



Кнудсен. режим



Скорость откачки СПМ должна быть в 9 раз выше



Чтобы сохранить давление в диверторе, ставим ограничительную диафрагму

ТРТ

$P_{\Sigma} = 3 \text{ Па}$

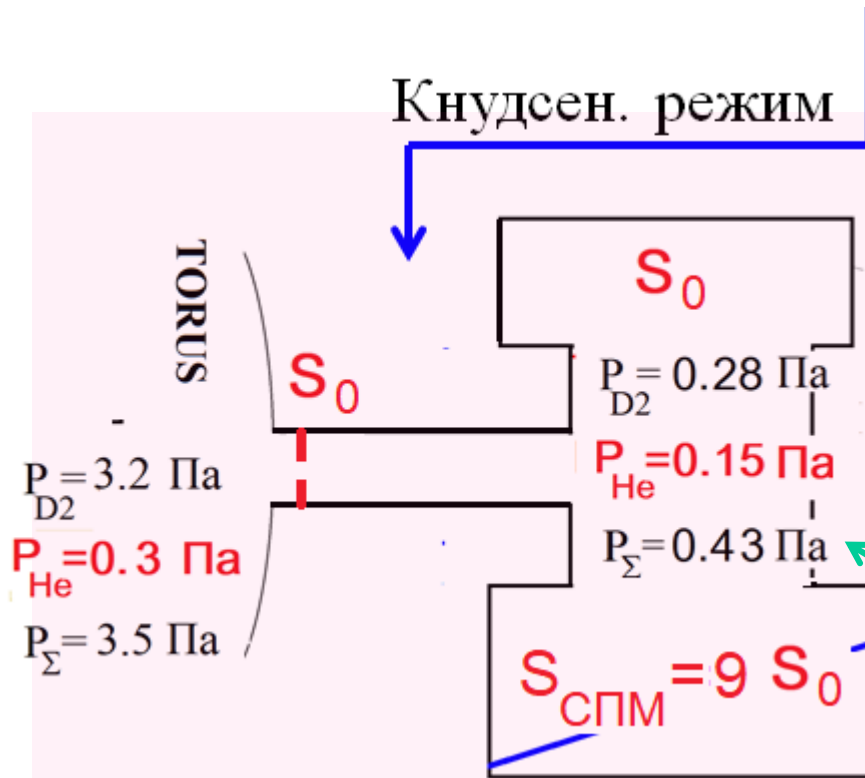
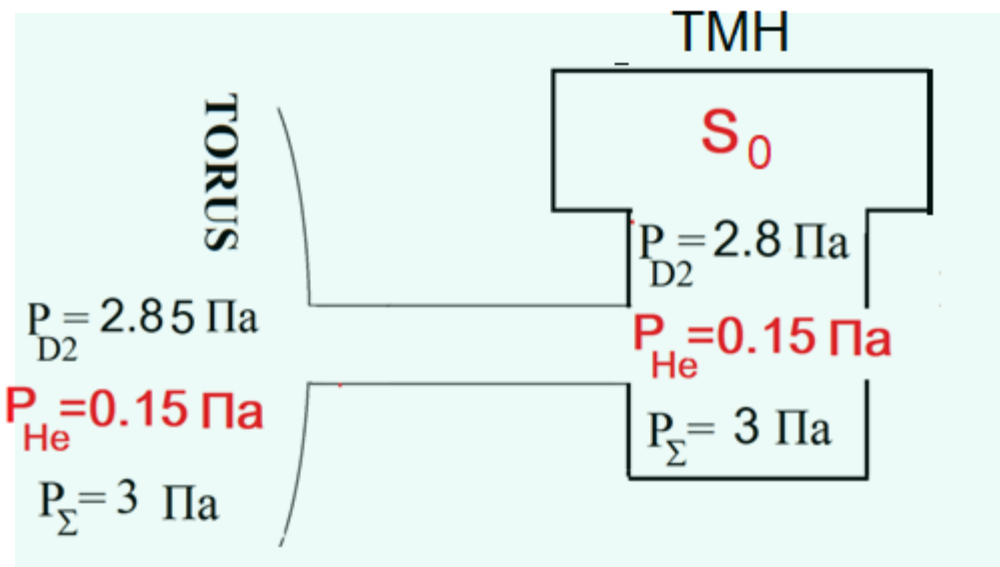
95%D2+5%He

12 линий откачки

$$J_{D2} = \frac{1}{12} \cdot 7.5 \cdot 10^{21} D_2 / c$$

Отделение 90% D2

Д.А. Карпов и др. Физика плазмы, 2021



10-кратный рост скорости откачки D2



Полное давление на порядок ниже, чем в диверторе

ТРТ

$$P_{\Sigma} = 3 \text{ Па}$$

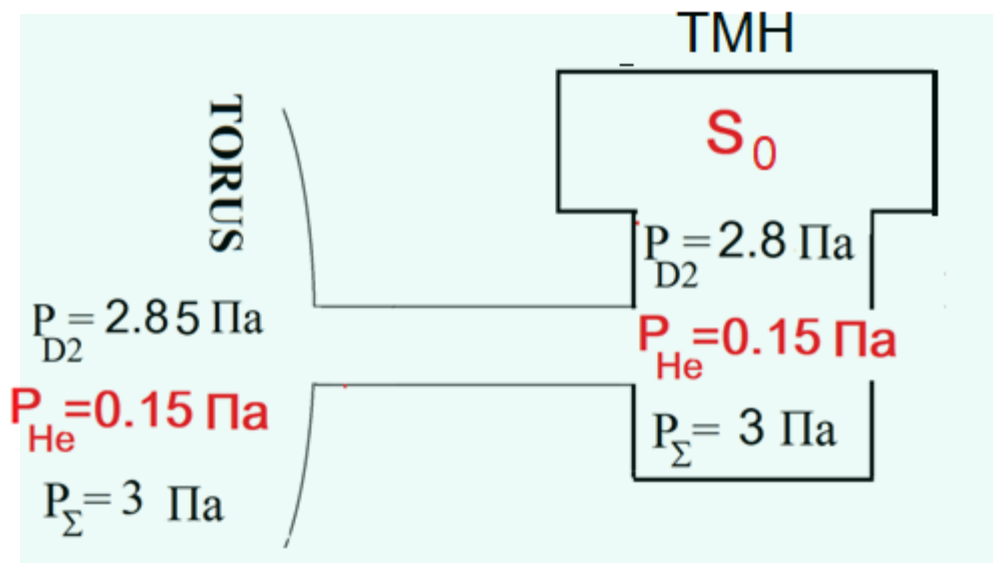
95%D2+5%He

12 линий откачки

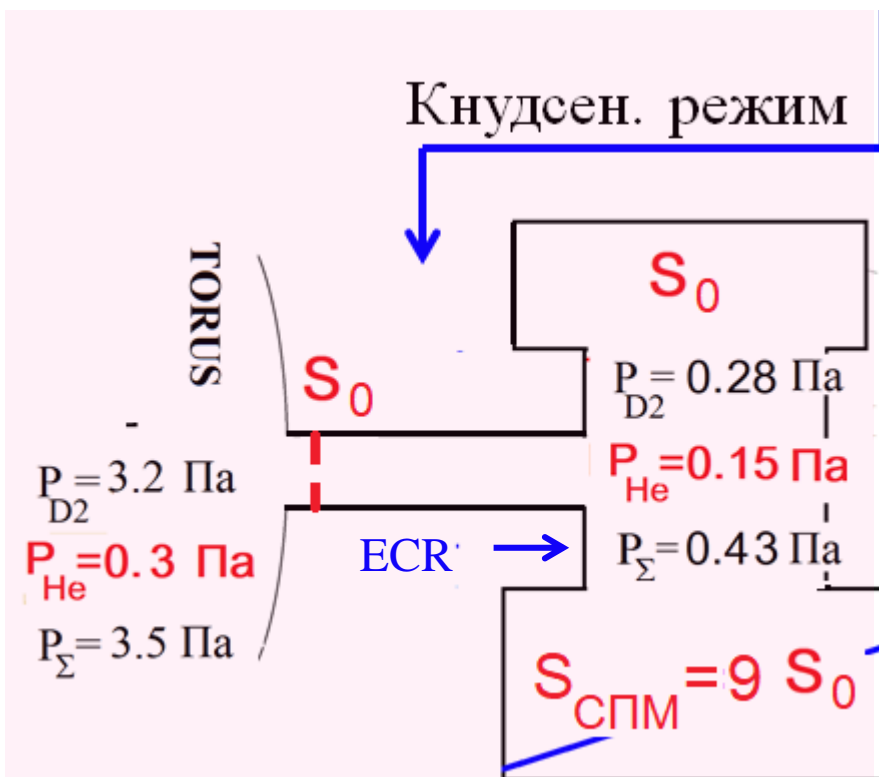
$$J_{D2} = \frac{1}{12} \cdot 7.5 \cdot 10^{21} D_2 / c$$

Отделение 90% D2

Д.А. Карпов и др. Физика
плазмы, 2021



Кнудсен. режим



Полное давление на порядок
ниже, чем в диверторе



Для генерации атомов в плазме
- разряд низкого давления
(ECR).

ТРТ

$P_{\Sigma} = 3 \text{ Па}$

95%D2+5%He

12 линий откачки

$$J_{D2} = \frac{1}{12} \cdot 7.5 \cdot 10^{21} D_2 / c$$

Отделение 90% D2

Д.А. Карпов и др. Физика
плазмы, 2021

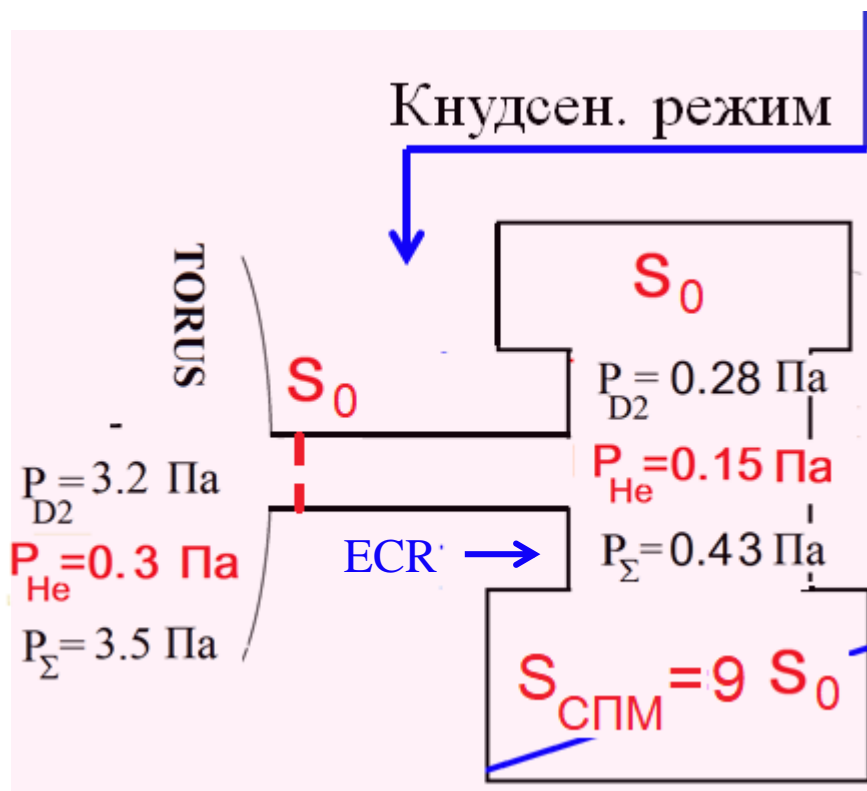
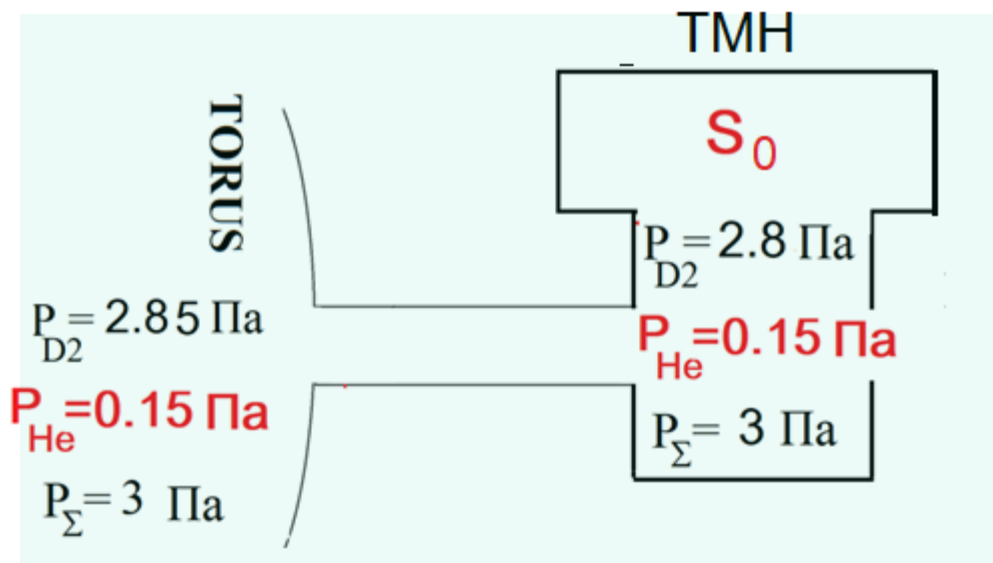


Схема позволяет отделить от He
и рециркулировать 90% D/T,

Именно эта схема предлагалась
для применения в ТЯР.

Никакой компрессии и откачки
He с помощью СПМ нет.

ТРТ

$$P_{\Sigma} = 3 \text{ Па}$$

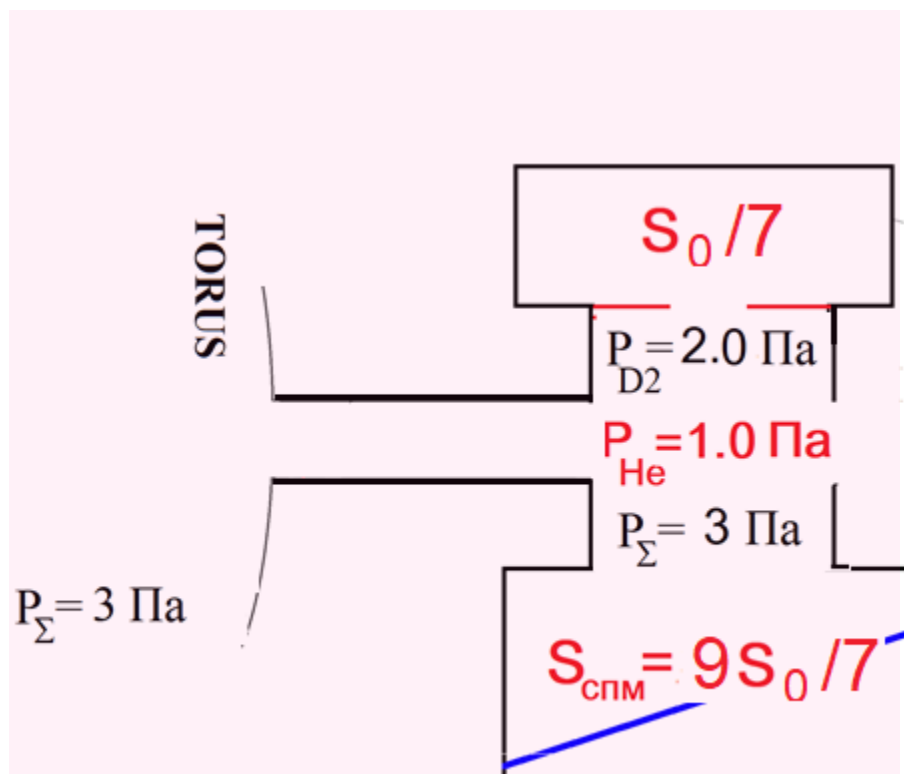
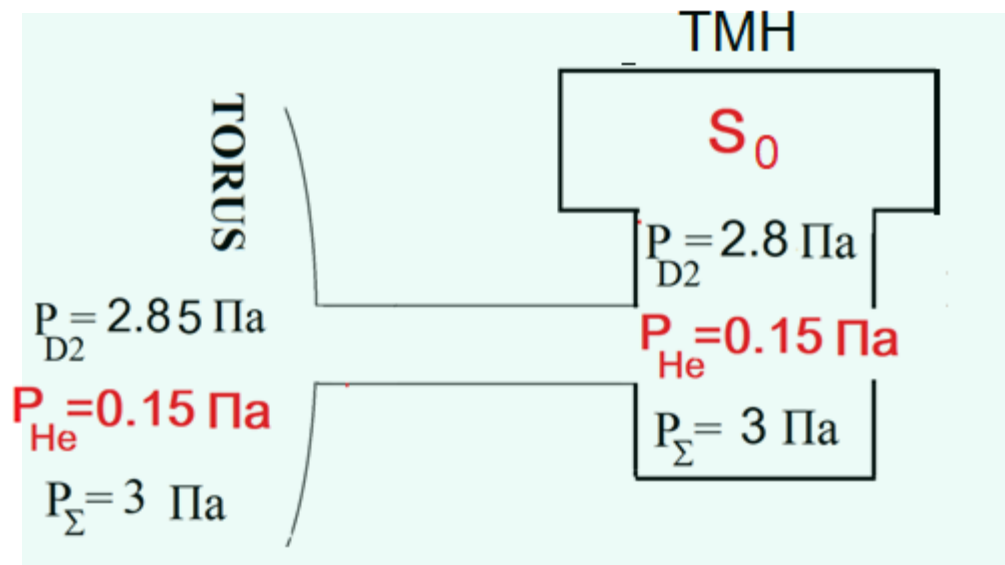
95%D2+5%He

12 линий откачки

$$J_{D2} = \frac{1}{12} \cdot 7.5 \cdot 10^{21} D_2 / c$$

Отделение 90% D2

Д.А. Карпов и др. Физика
плазмы, 2021



2. Чтобы сохранить давление в диверторе, снижаем скорость откачки каждого насоса в 7 раз.

Однако, давление He возрастёт в 7 раз

ТРТ

$$P_{\Sigma} = 3 \text{ Па}$$

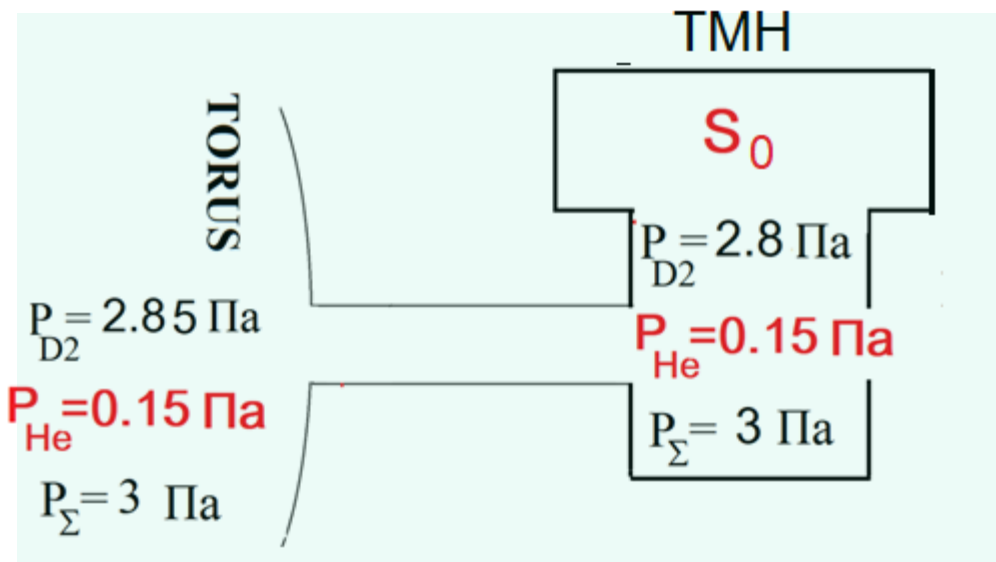
95%D2+5%He

12 линий откачки

$$J_{D2} = \frac{1}{12} \cdot 7.5 \cdot 10^{21} D_2 / c$$

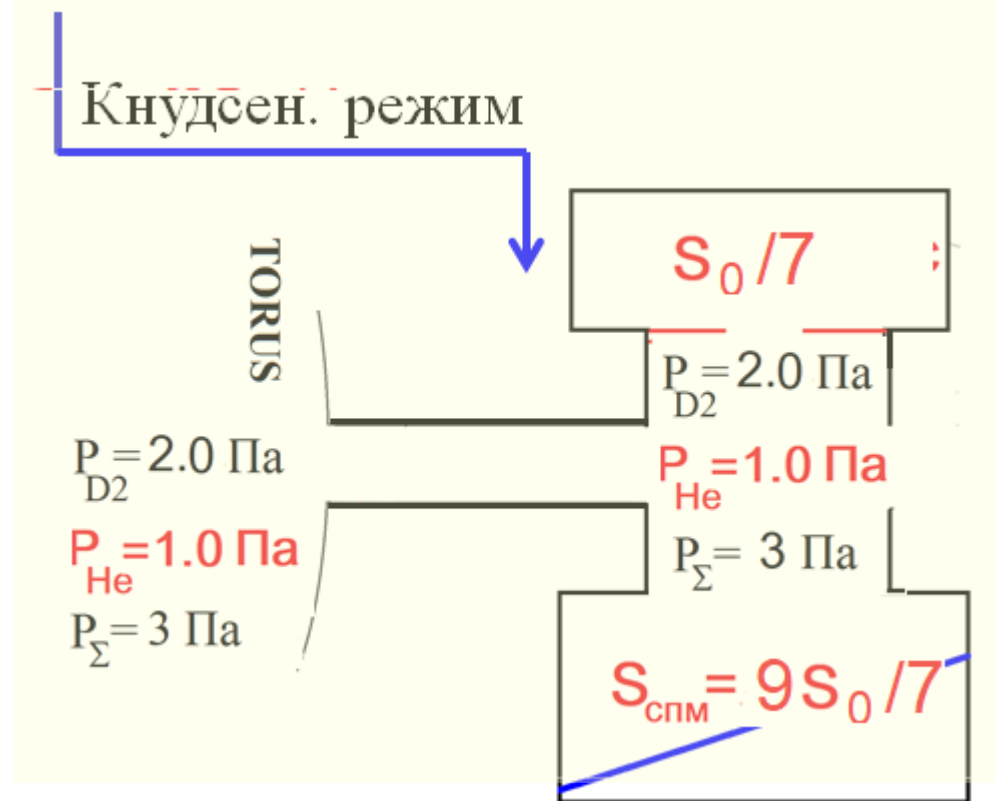
Отделение 90% D2

Д.А. Карпов и др. Физика
плазмы, 2021



Если режим течения
кнудсеновский, то точно
также изменится и состав
газа в дивернторе.

Считаем это неприемлемым
и в случае **Кнудсеновского**
режима принимаем 1-й
вариант.



ТРТ

$$P_{\Sigma} = 3 \text{ Па}$$

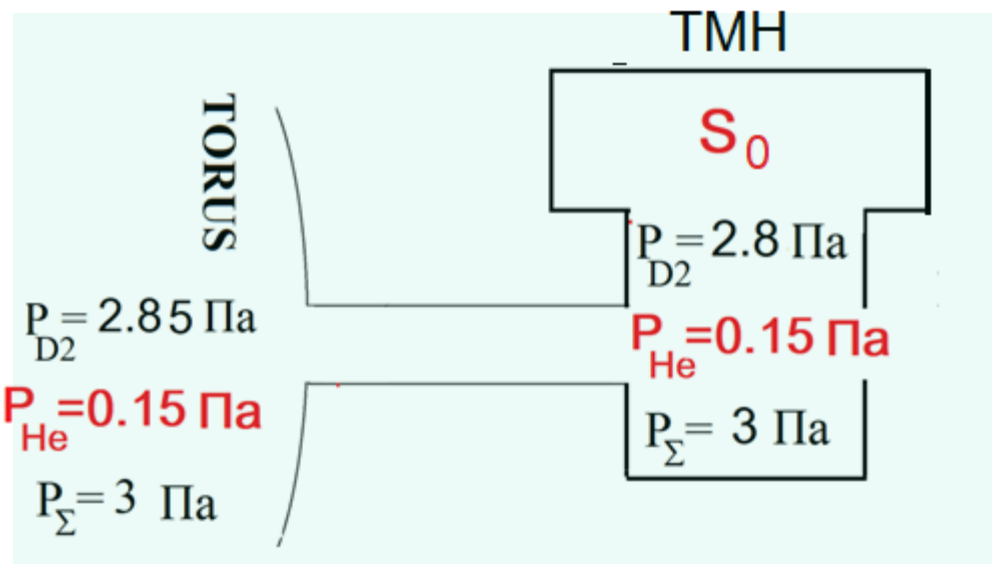
95%D2+5%He

12 линий откачки

$$J_{D2} = \frac{1}{12} \cdot 7.5 \cdot 10^{21} D_2 / c$$

Отделение 90% D2

Д.А. Карпов и др. Физика плазмы, 2021



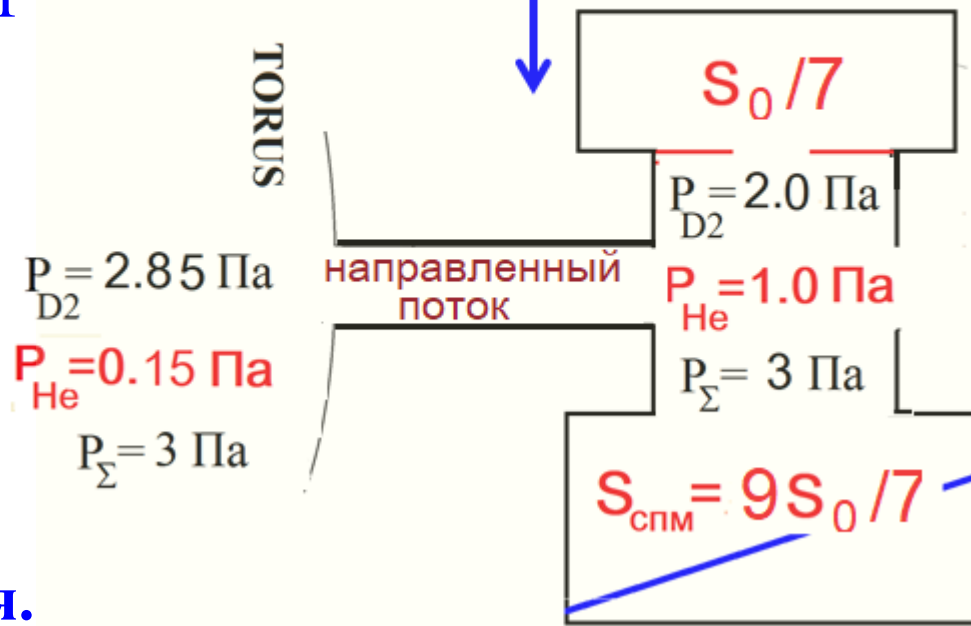
$P_{\Sigma} = 3 \text{ Па}$ \longrightarrow Режим течения
выхлопной смеси **ВЯЗКОСТНЫЙ**

Направленный поток.

Диффузия частиц газа *против*
потока блокирована

Изменение состава ниже по
течению не влияет на состав в
диверторе. **Проблема снимается.**

Вязкостн. режим



ТРТ

$$P_{\Sigma} = 3 \text{ Па}$$

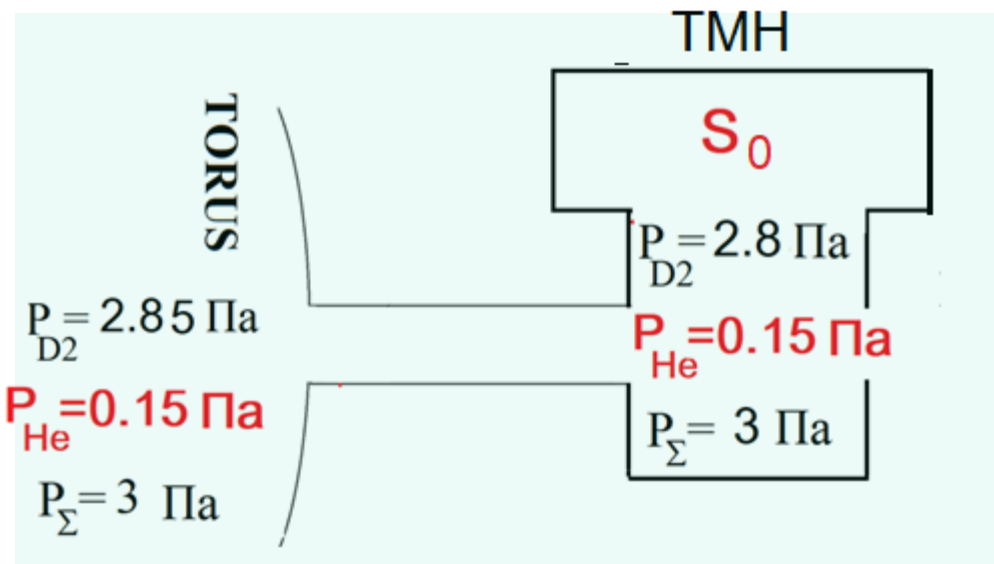
95%D2+5%He

12 линий откачки, 24 ТМН

$$J_{D2} = \frac{1}{12} \cdot 7.5 \cdot 10^{21} D_2 / c$$

Отделение 90% D2

Д.А. Карпов и др. Физика
плазмы, 2021



Парциальное давление He:

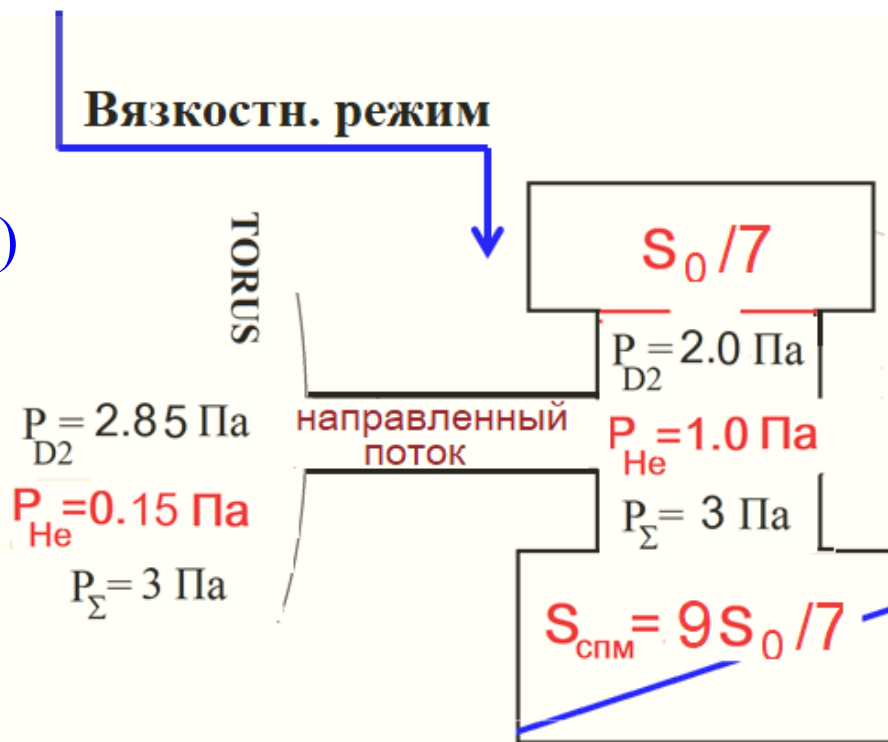
в диверторе – исходное (0.15 Па)

в зоне откачки – в 7 раз выше (1.0 Па)

Компрессия He с помощью СПМ

Для откачки того же потока He
требуется в 7 раз меньшая
скорость откачки ТМН.

СПМ - первая ступень откачки He



ТРТ

$$P_{\Sigma} = 3 \text{ Па}$$

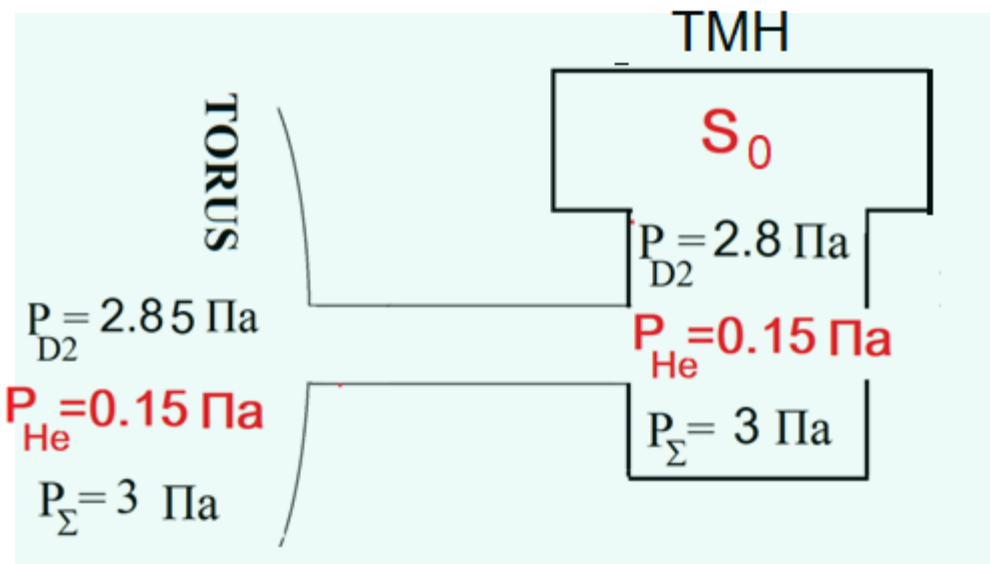
95%D2+5%He

12 линий откачки, 24 ТМН

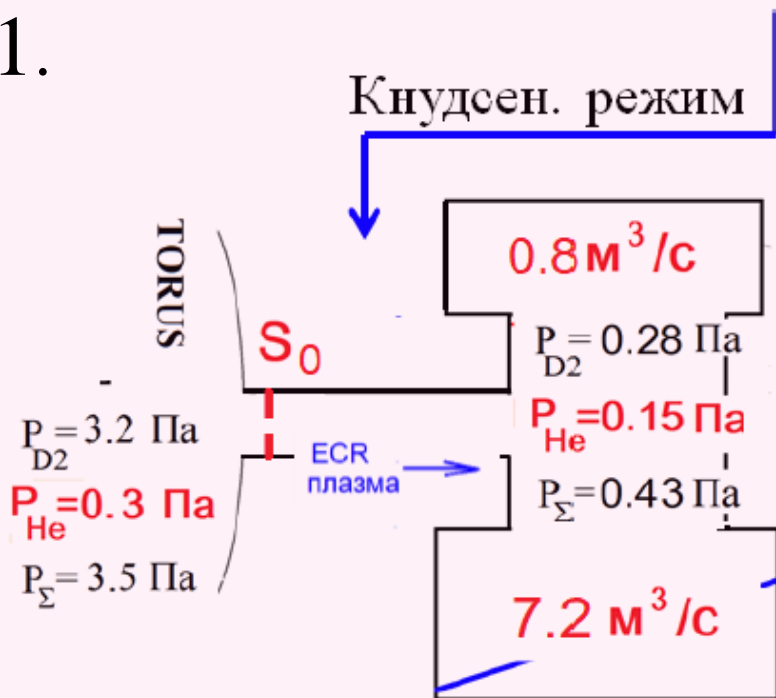
$$J_{D2} = \frac{1}{12} \cdot 7.5 \cdot 10^{21} D_2 / c$$

Отделение 90% D2

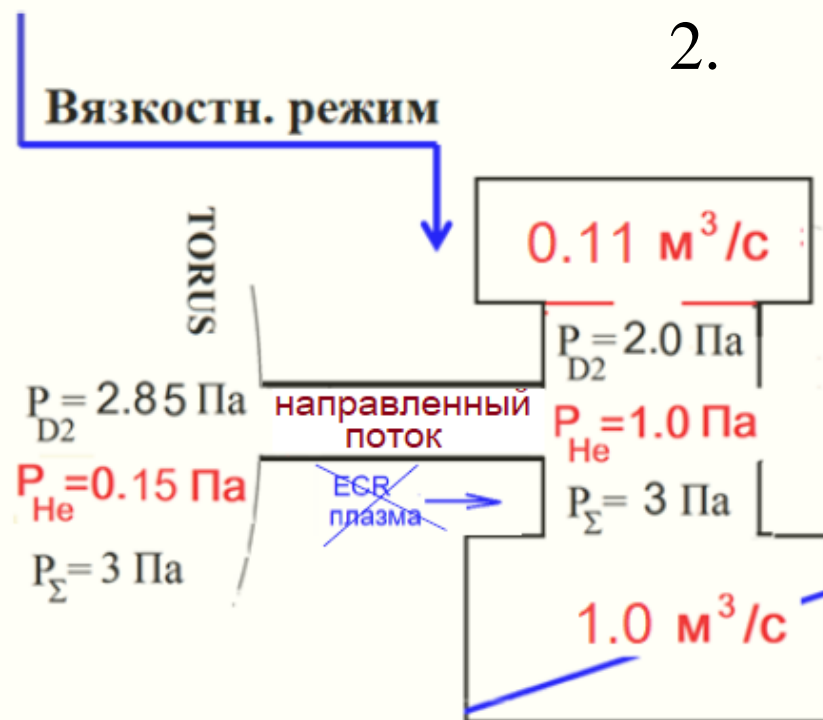
Д.А. Карпов и др. Физика
плазмы, 2021



1.



2.



ТРТ

$$P_{\Sigma} = 3 \text{ Па}$$

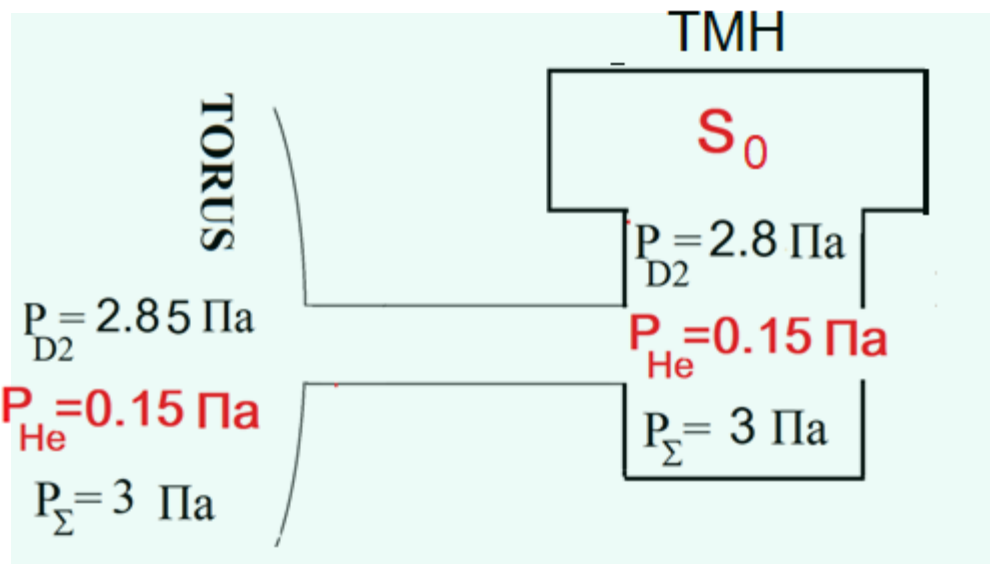
95%D2+5%He

12 линий откачки, 24 ТМН

$$J_{D2} = \frac{1}{12} \cdot 7.5 \cdot 10^{21} D_2 / c$$

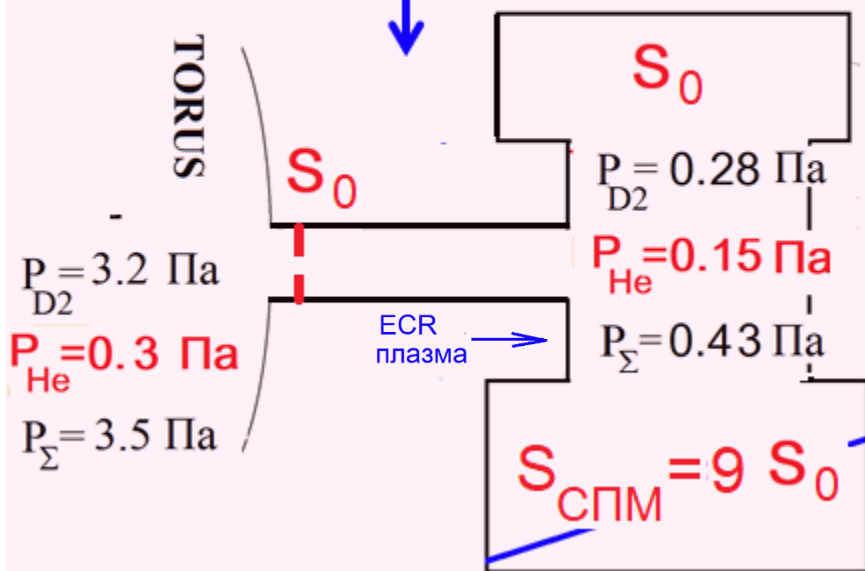
Отделение 90% D2

Д.А. Карпов и др. Физика
плазмы, 2021



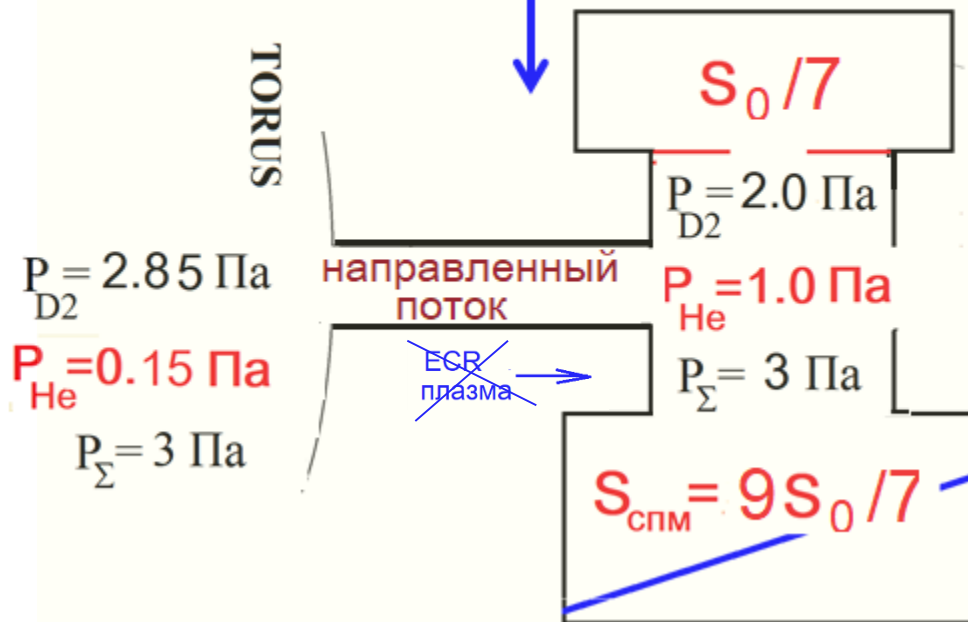
1.

Кнудсен. режим



Вязкостн. режим

2.



Что предлагается сделать

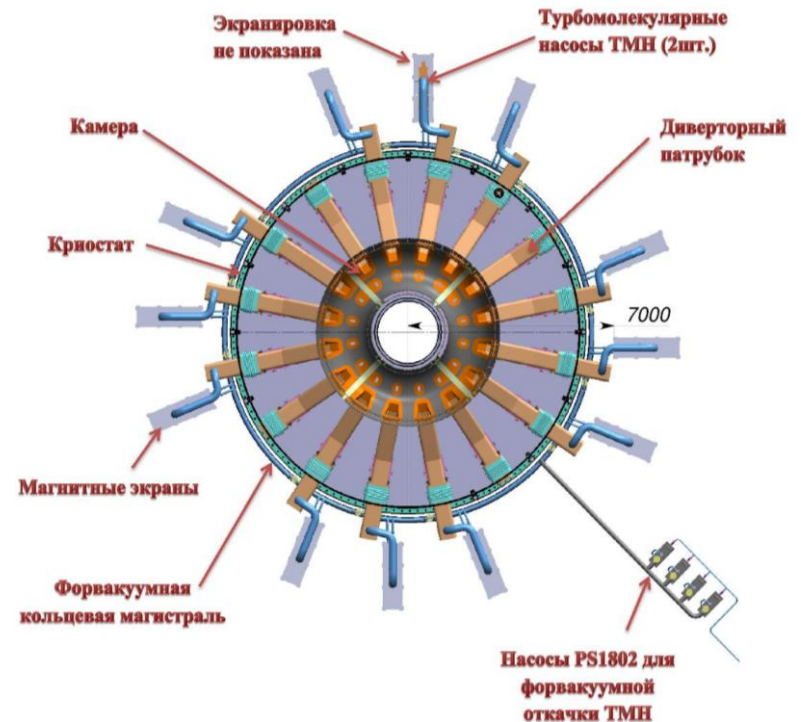
Основная проблема откачки ТЯР - наличие трития.

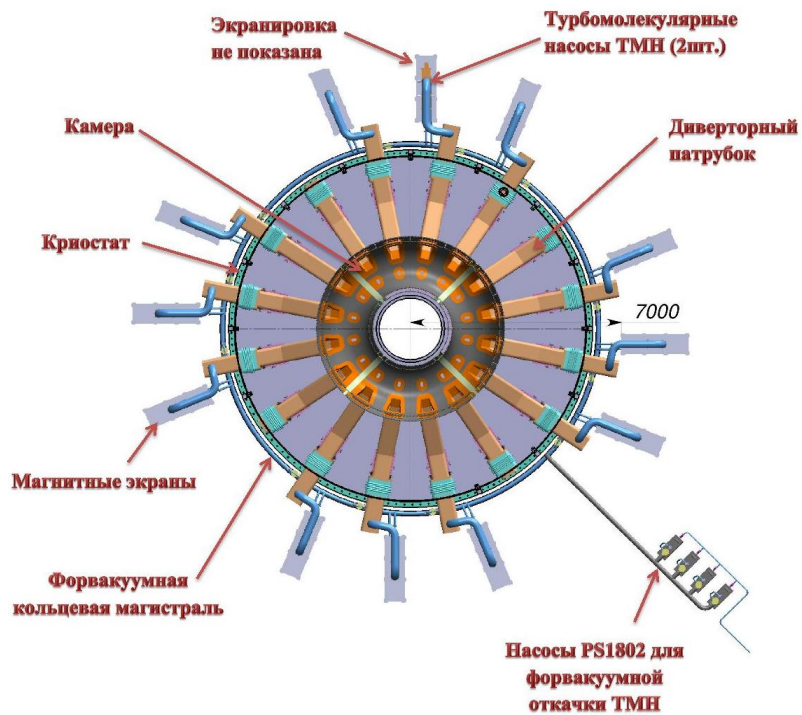
Не существует стандартных средств откачки, совместимых с тритием.

Технологии, используемые в ИТЭРе, самими их создателями (KIT) признаны непригодными для пост-ИТЭРовских машин, и для EU DEMO разрабатывается система, основанная на СПМ.

Важно, чтобы на до-третиевой стадии работы были разработаны системы откачки и рециркулирования D/T-смеси.

Такую систему предлагается сделать и испытать в реальных условиях установи УТС, а именно, в ТРТ в сотрудничестве с НИИЭФА

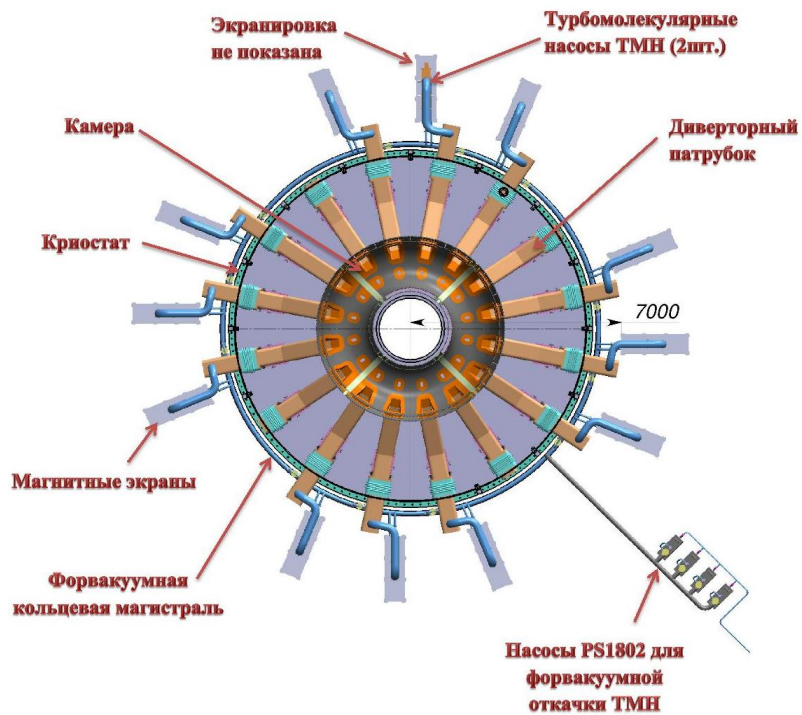




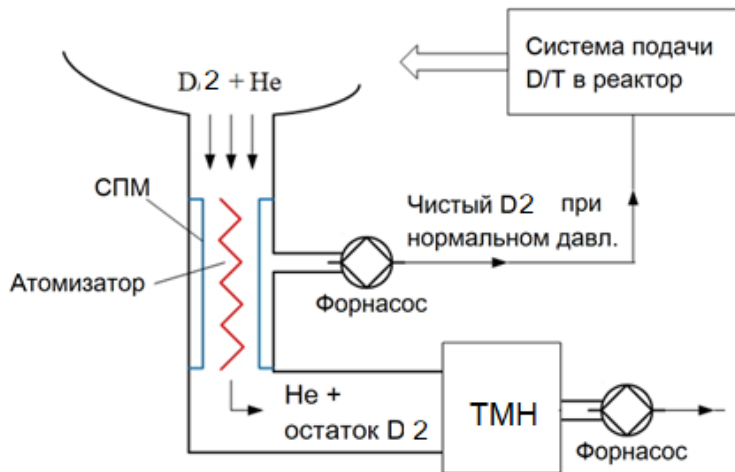
Предполагается, что для откачки ТРТ будут задействованы 12 (из 16) диверторных портов.

В каждой из 12 линий непосредственно на выходе диверторных патрубков будут установлены ТМН в магнитной экранировке.

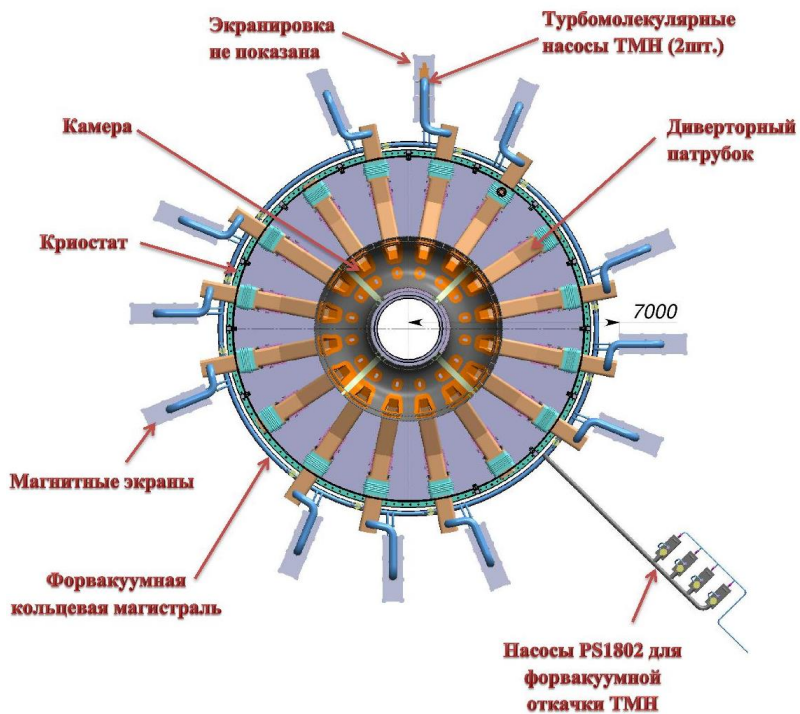
Предлагается организовать отделение от He и рециркуляцию D2 с помощью СПМ в одной из 12 откачных линий (в сотрудничестве с НИИЭФА).



СПМ-насос предполагается установить в отводном патрубке перед ТМН.



Мембранный насос должен продемонстрировать отделение от примесей (He, Ar), откачку и компрессию большей части потока D₂ (предположительно, 90%), который до-компримируется до 1 бар форнасосом (в одну стадию).



Поток D2 в одной линии - $6.2 \cdot 10^{20}$ D2/с

При достигнутой удельной производительности СПМ $\approx 10^{21}$ D2/(м²с), потребуется СПМ площадью ≈ 0.6 м².

Площадь мембраны в модельном эксперименте была 0.063 м².



Представляется целесообразным сделать конструкцию СПМ-насоса модульной.

Модель СПМ-насоса в завершённом проекте - прототип модуля

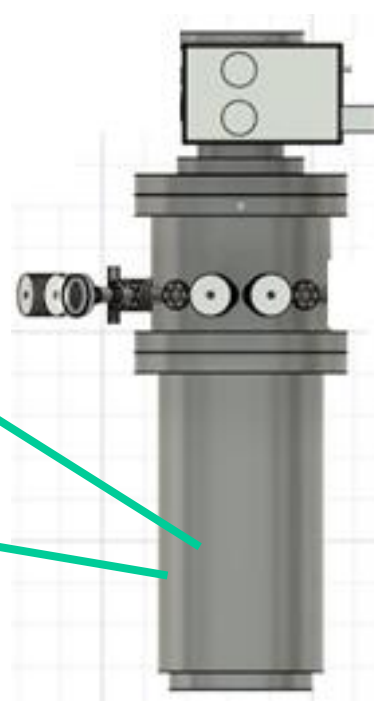
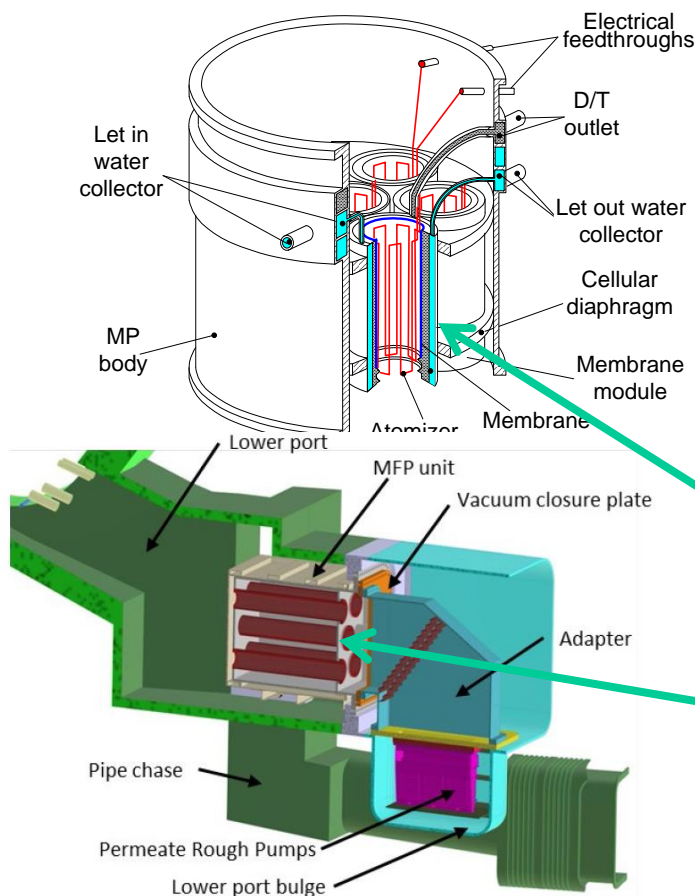
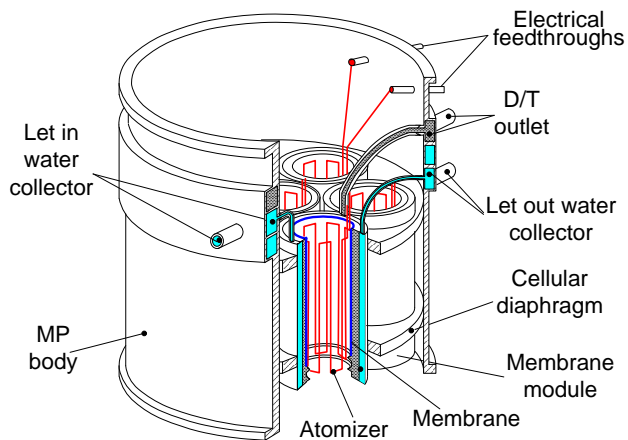


Fig. 9: Proposed setup of the MFP inside the lower port



Если ограничиться 4-мя модулями, единственный модуль должен быть в 2.5 раза более производительным, чем прототип, соответственно линейные размеры прототипа должны быть увеличены в $\sqrt{2.5} \approx 1.6$ раза.



В качестве подготовки для испытаний СПМ-технологии в ТРТ предлагается:

- разработать модульную конструкцию СПМ-насоса *(в сотрудничестве с НИИЭФА)*,
- создать СПМ-модуль и испытать его в лаборатории в условиях, ожидаемых в ТРТ,
- с помощью СПМ-модуля продемонстрировать
 - ❖ отделение от He и рециркуляцию D₂,
 - ❖ возможность откачки He,
 - ❖ возможность кратного сокращения требуемых скоростей откачки СПМ- и ТМН-насосов.

Спасибо за внимание

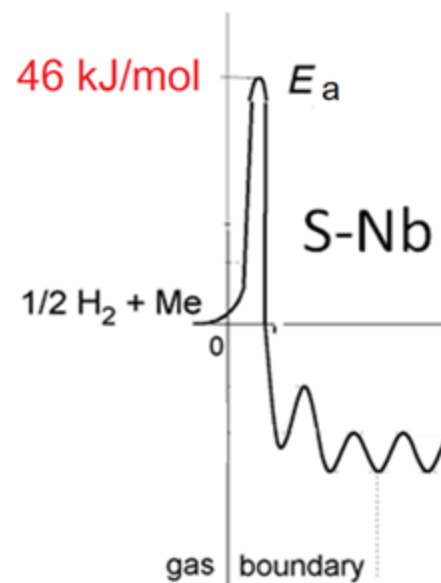
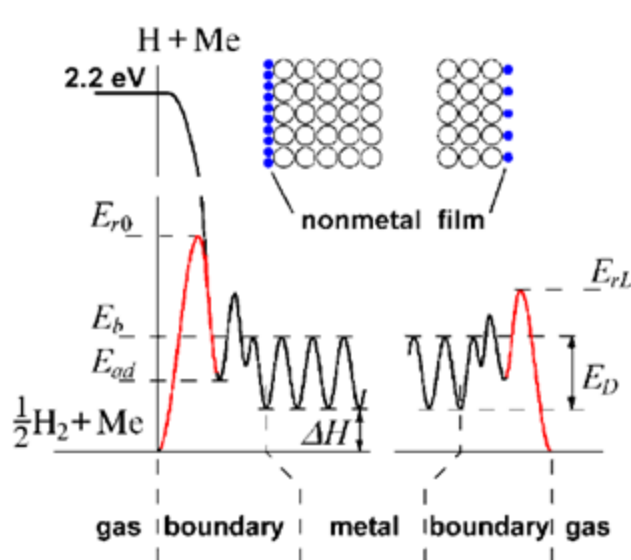
Прямокальный нагрев СПМ

технически значимого
размера -
нетривиальная задача,
решённая впервые

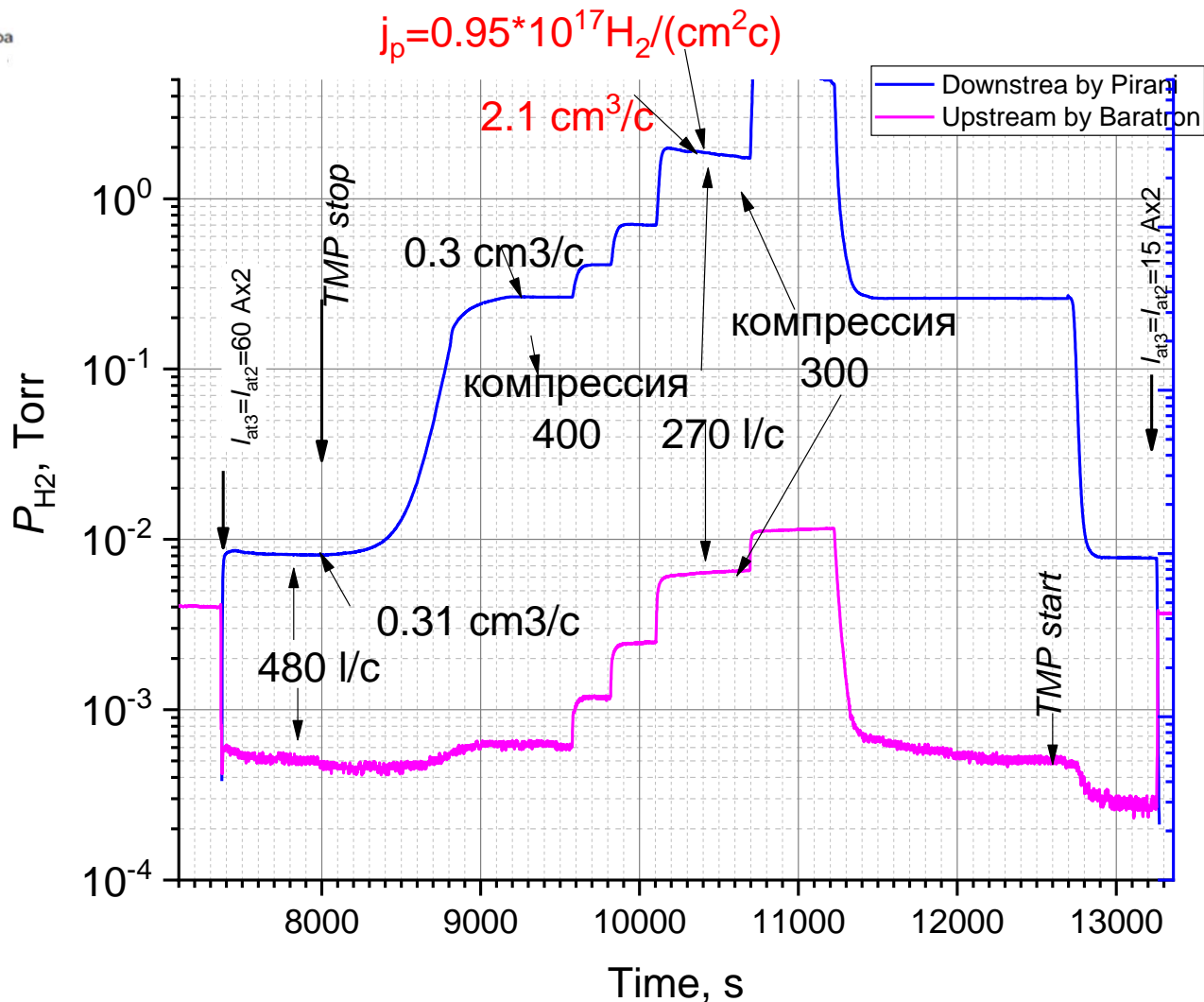
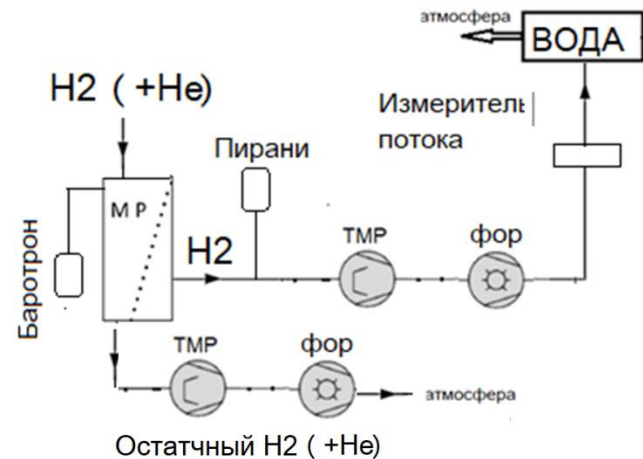


Возможность чистого высокотемпературного
нагрева – позволяет
получить/восстановить, требуемое состояние
поверхности, в первую очередь, требуемый
барьер.

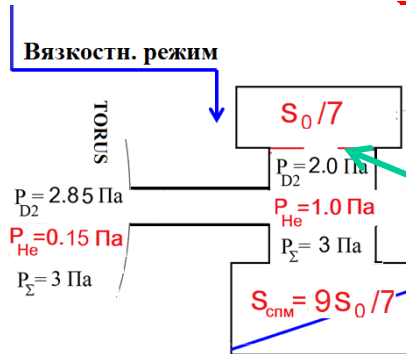
Благодаря высокотемпературному нагреву,
осуществлена сульфуризация поверхности
СПМ, позволившая достигнуть требуемых
параметров.



ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ДЕМОНСТРАЦИЯ СПМ РЕЦИРКУЛЯЦИИ **МАКСИМАЛЬНОГО** **ПОТОКА** С ФИНАЛЬНЫМ СЖАТИЕМ С ПОМОЩЬЮ **ТОЛЬКО ФОРА**



Где в концепции испытаний в ТРТ использование/проверка идей про He и сокращение насосов



Важный элемент моделирования — изменяемая диафрагма на входе в ТМН

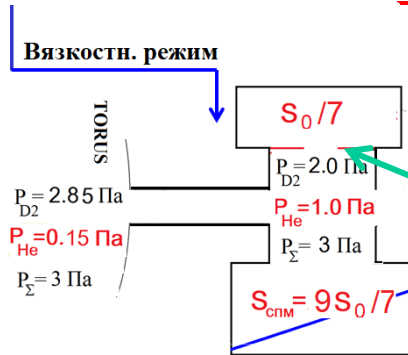


1. СПМ выключена. Диафрагма открыта так, что система откачивается ТМН со скоростью S_0 (800 л/с) при давлении 3 Па и полном потоке D2 и He. При этом давление в области собственно насосов существенно ниже, например 0.3 Па, и соответственно скорость откачки собственно ТМН в 10 раз выше (8000 л/с)
2. СПМ включена. Для того, что бы отобрать 90% D2 и сохранить давление в диверторе, диафрагма прикрывается так, чтобы эффективная скорость ТМН откачки стала $S_0/7$. При этом

А. требуется СПМ со скоростью откачки $9S_0/7$ (а не $9S_0$ когда бы потребовалась большая площадь СПМ и атомизатора, давление в СПМ было бы в 7 раз ниже, а плотность потока через СПМ соответственно ниже).

Б. He продолжает откачиваться из дивертора со скоростью S_0 , благодаря откачке и компрессии He с помощью СПМ. Если оставить скорость откачки собственно ТМН без изменения, то давление на их входе будет сильно ниже (наверное в 7 раз) благодаря сокращению потока D2 в 10 раз. Потому скорость откачки собственно ТМН можно снизить (наверное в 7 раз). Т.е. **РЕАЛЬНО** уменьшить число/размер требуемых ТМН)

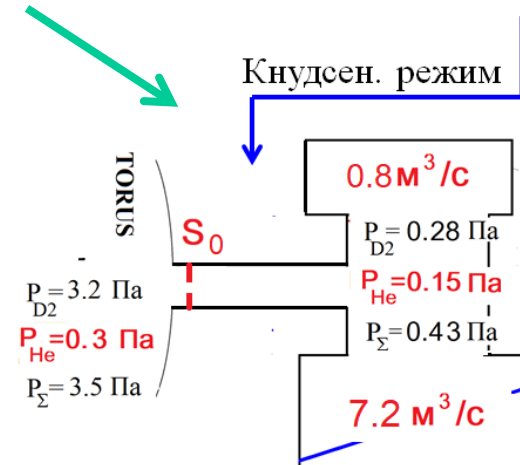
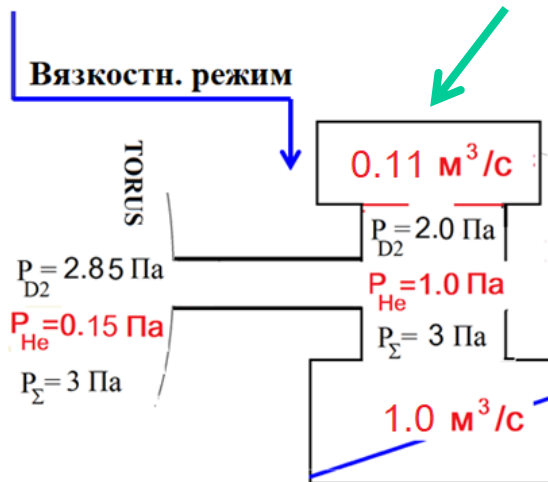
Где в концепции испытаний в ТРТ использование/проверка идей про He и сокращение насосов



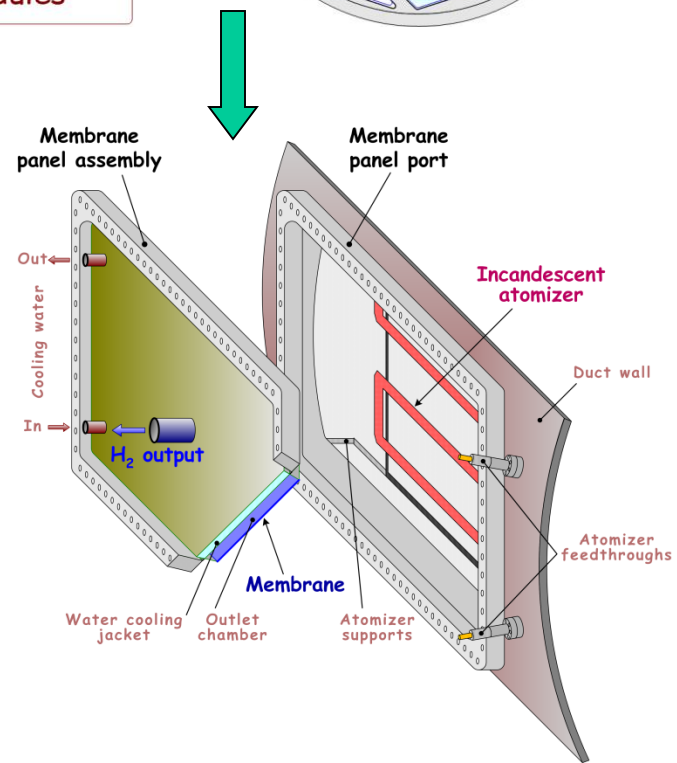
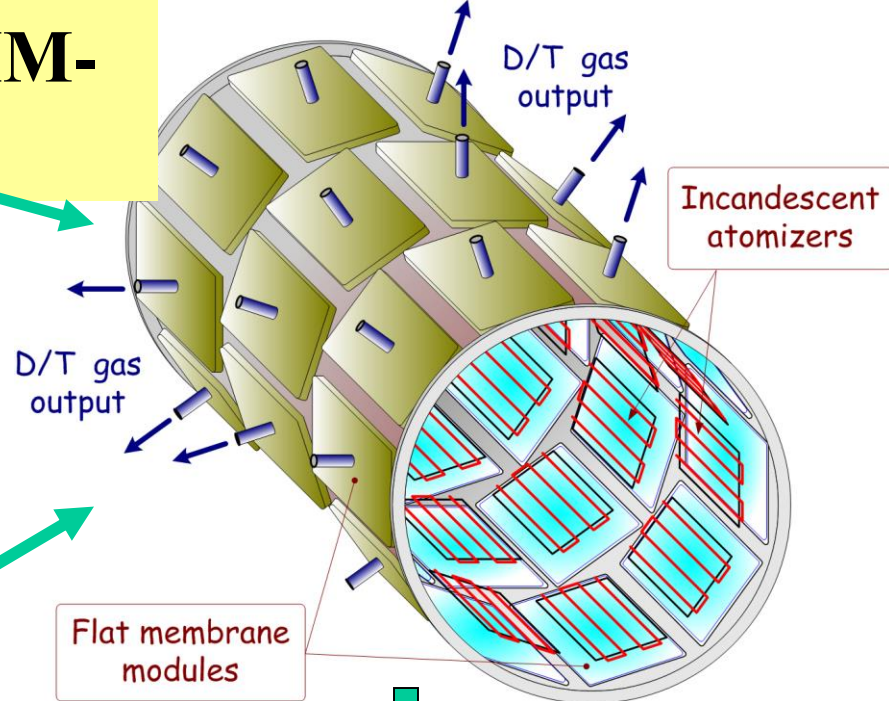
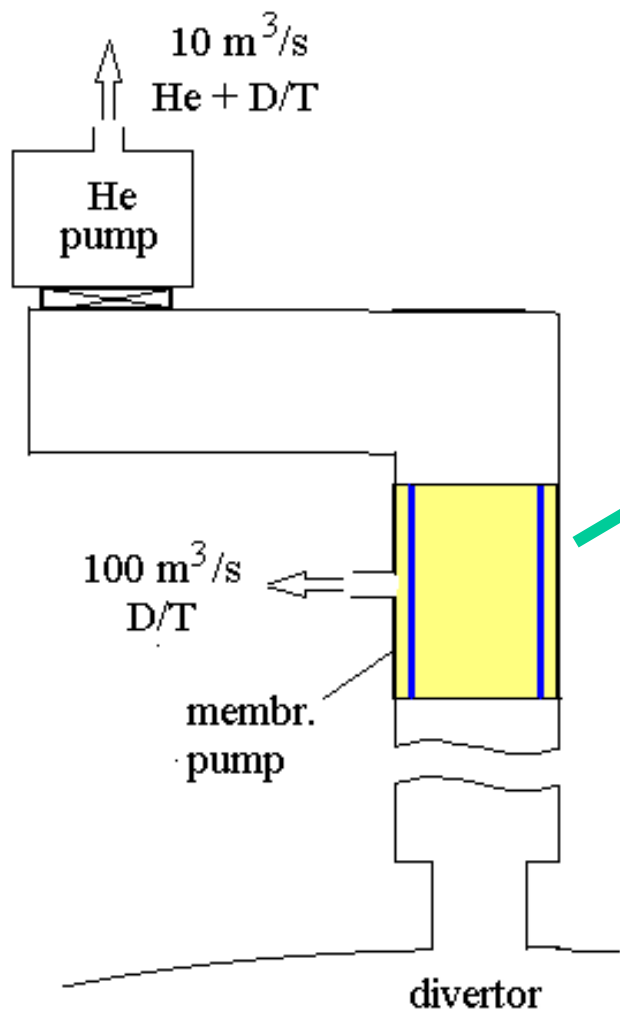
Важный элемент моделирования — изменяемая диафрагма на входе в ТМН



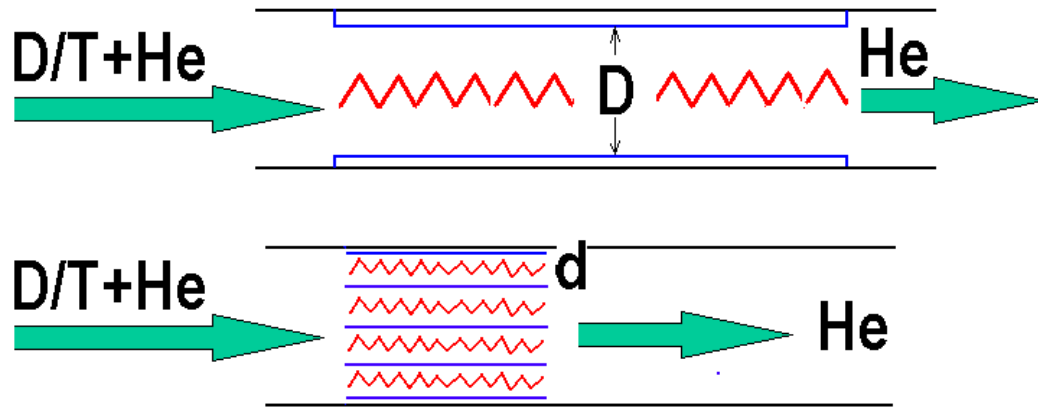
Резюме. Предлагаемая концепция изначально исходит из использования эффектов вязкостного потока. Т.е. уже считается что СПМ He откачит He и благодаря этому можно снизить скорость откачки обоих насосов. В этой концепции нет ограничительной диафрагмы на входе в дивертор и откачка СПМ происходит при давлении в диверторе Па. Другими словами изначально выбран этот, а не этот вариант



Модульная конструкция СПМ-насоса («2D» версия)



«3D» версия модульной конструкции СПМ-насоса

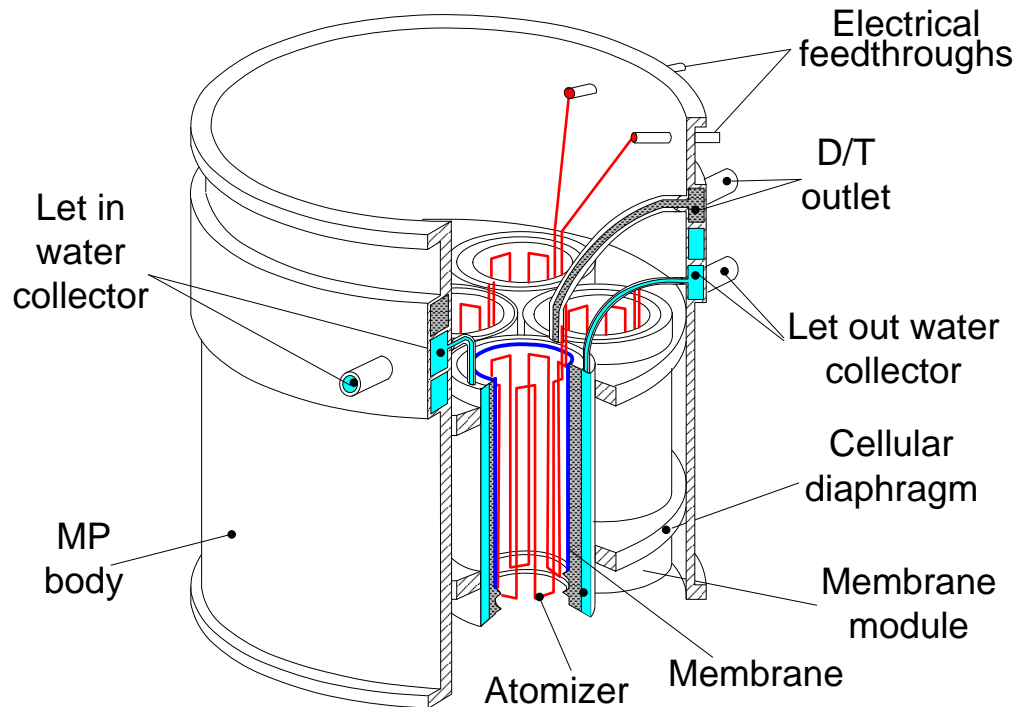


If total area of the membrane is the same in 3-D and in 2-D configurations, then

- (1) D/T pumping speed,
- (2) tritium retention,
- (3) required power,
- (4) **He pumping speed** will be the same as well.

However the required length of 3-D membrane system is shorter by D/d times (!!)

Each module is a separate pump having the membrane, atomizer and water cooling.



2023

Experimental Progress in the Development of a Metal Foil Pump for DEMO

Yannick Kathage^{1,*}, Alejandro Vazquez Cortes¹, Stefan Merli², Christian Day¹, Thomas Giegerich¹, Stefan Hanke¹, Juri Igitkhanov¹

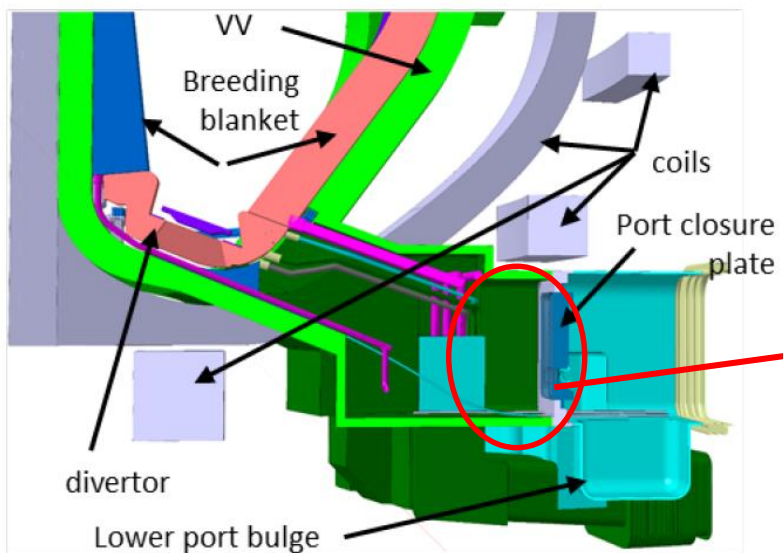


Fig. 2: Simplified illustration of the lower port with main components

To alleviate the effects of reduced conductance, placing a pumping device close to the the divertor is very beneficial for the primary pumping stage. This means that the integration of this pumping stage in the lower port would be best.

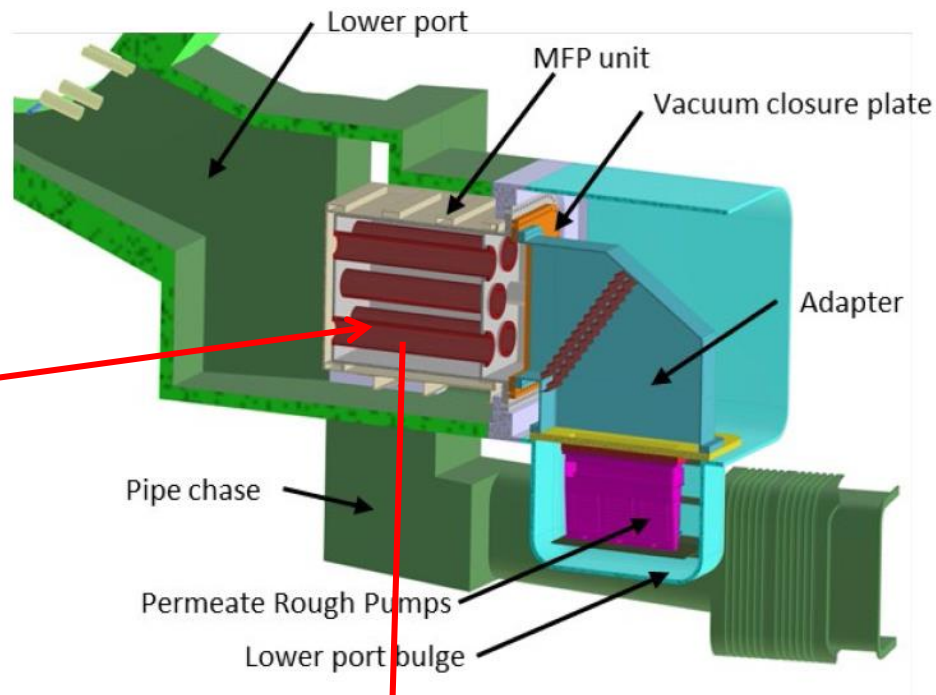
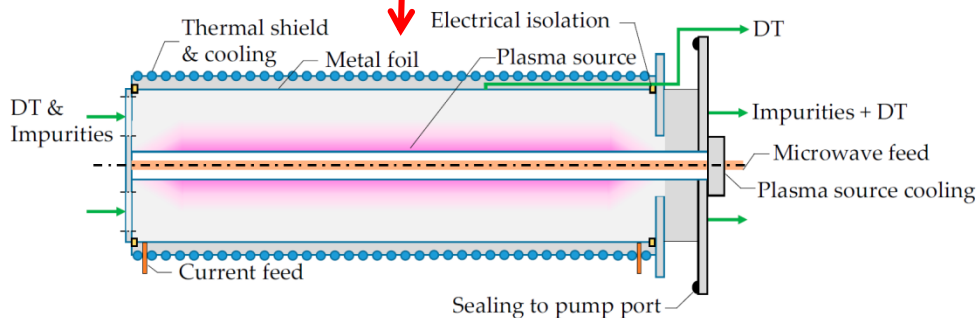
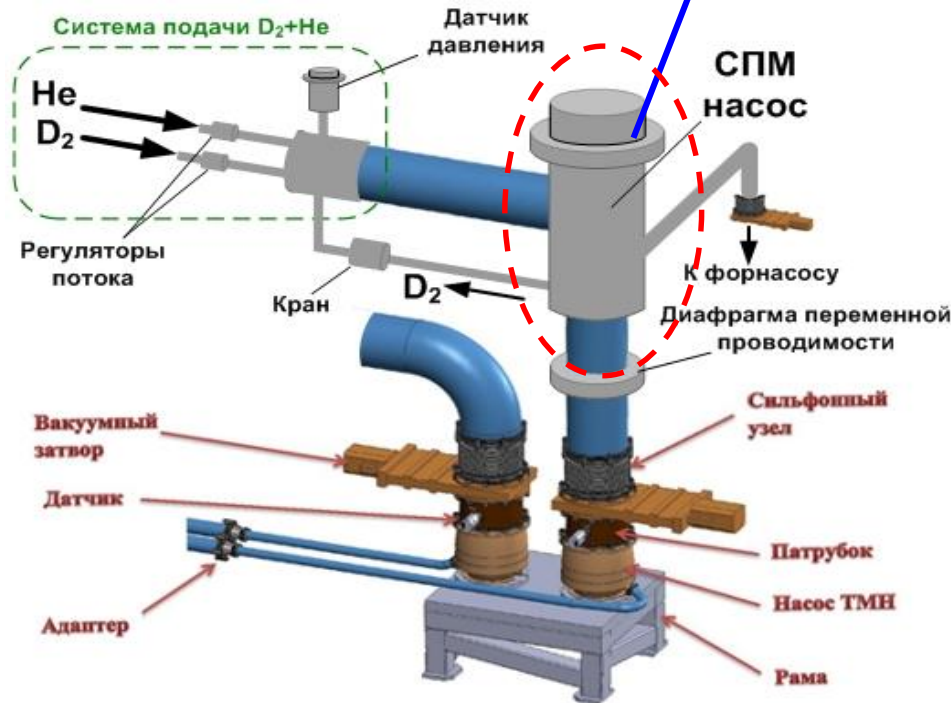
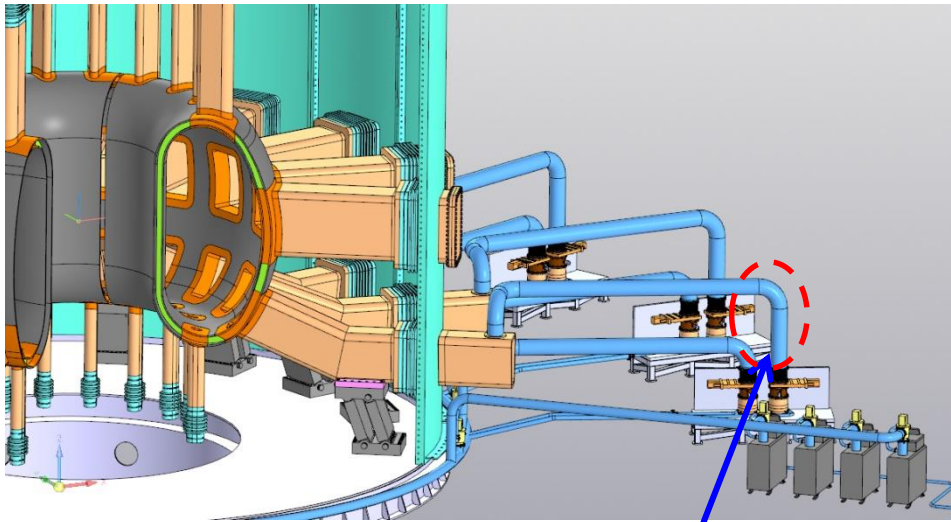


Fig. 9: Proposed setup of the MFP inside the lower port





Предложение по развитию СПМ-технологии на ДО-тритиевой стадии ТРТ.

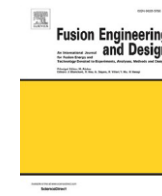
Планируется откачка ТРТ с помощью 32 ТМН, расположенных на значительном удалении от криостата.

Предлагается установить СПМ-насос в одну из откачных линий, исследовать селективную откачку и рециркуляцию D_2 и таким образом подготовиться к селективной откачке D/T на тритиевой стадии.

Некоторые зарубежные публикации 2022-2023 на тему применения СПМ в ТЯР

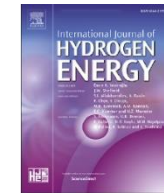
The pre-concept design of the DEMO tritium, matter injection and vacuum systems

Chr. Day^{a,*}, K. Battes^a, B. Butler^b, S. Davies^b, L. Farina^e, A. Frattolillo^e, R. George^b, T. Giegerich^a, S. Hanke^a, T. Härtl^c, Y. Igitkhanov^a, T. Jackson^b, N. Jayasekera^b, Y. Kathage^a, P.T. Lang^d, R. Lawless^b, X. Luo^a, C. Neugebauer^a, B. Ploeckl^d, A. Santucci^e, J. Schwenzer^a, T. Teichmann^a, T. Tijssen^b, S. Tosti^e, S. Varoutis^a, A. Vazquez Cortes^a



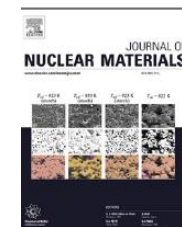
Permeation of low-pressure deuterium through niobium under radio-frequency plasma condition

Wei Jin^a, Xinchun Mao^b, Yakun Guo^a, Changan Chen^{b,*}



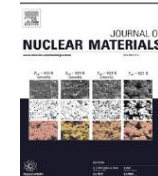
Low temperature hydrogen plasma permeation in palladium and its alloys for fuel recycling in fusion systems

Chao Li^a, Adam J. Job^a, Thomas F. Fuerst^b, Masashi Shimada^b, J. Douglas Way^a, Colin A. Wolden^{a,*}



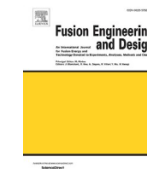
The influence of deuterium ions on the deuterium permeation and retention behavior in V-4Cr-4Ti alloy under plasma loading

HaoDong Liu^a, Hai-Shan Zhou^{a,b,*}, Guang-Nan Luo^{a,b}, Peng-Fei Zheng^c

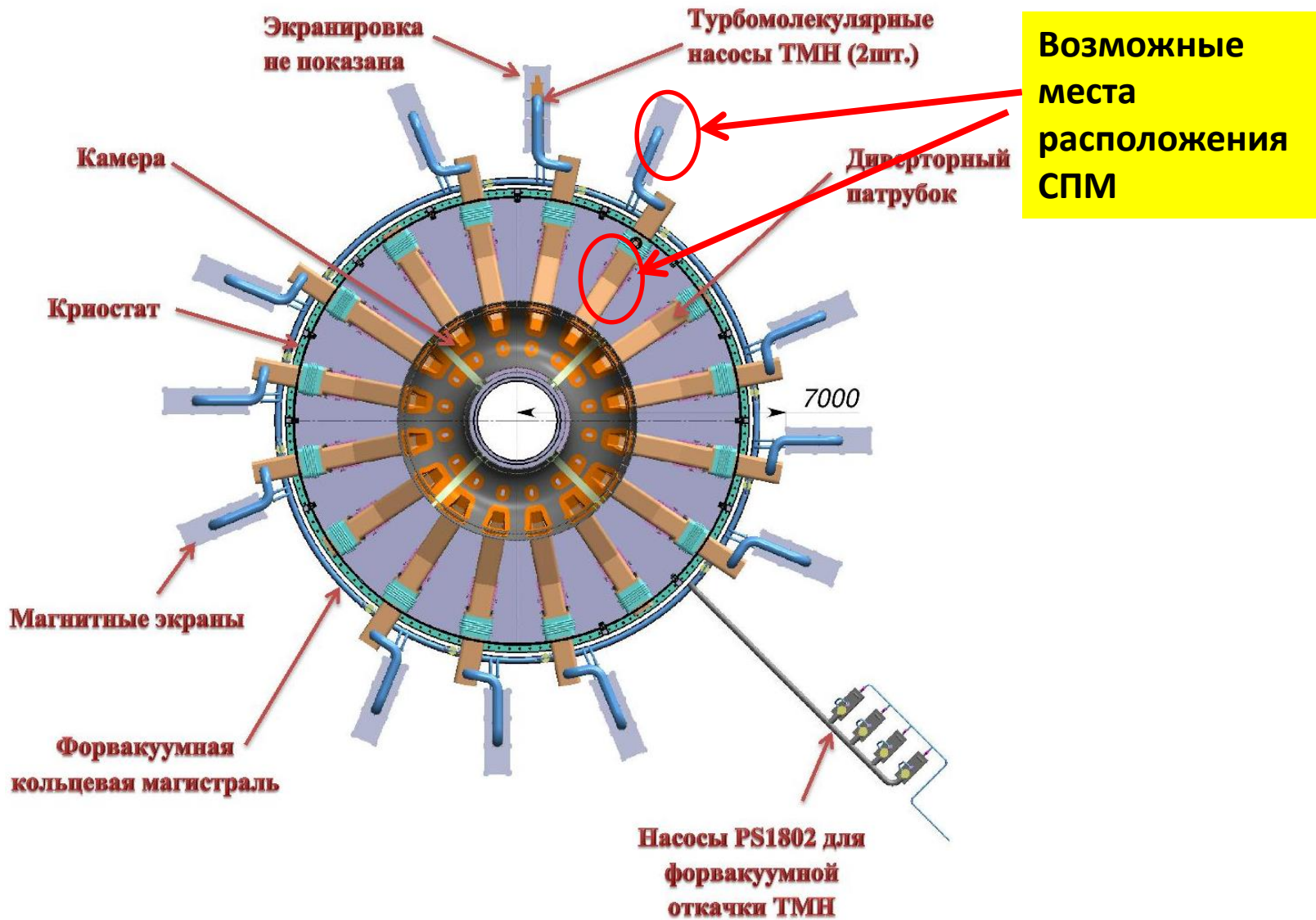


Deuterium plasma-driven permeation through vanadium, niobium and tantalum membranes

Lu Wang^{a,b}, Hai-Shan Zhou^{a,b,*}, Hao-Dong Liu^a, Yu-Ping Xu^a, Qiang Qi^{a,c}, Guang-Nan Luo^a

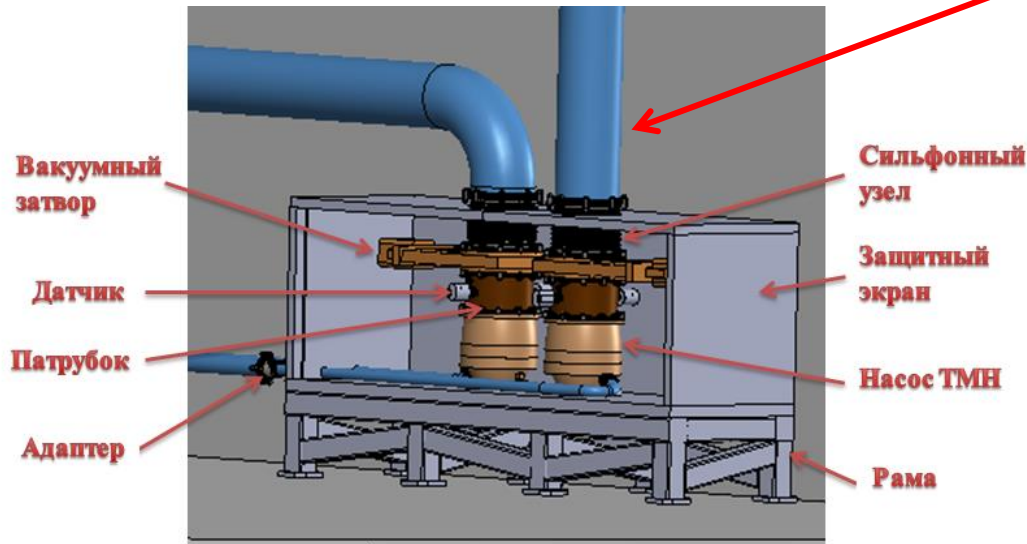
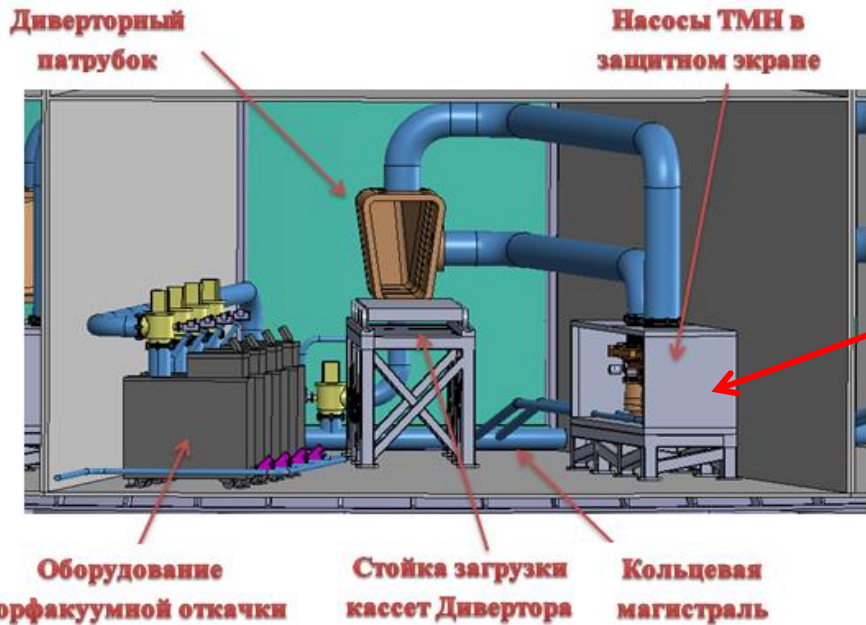


Компоновка СВО вакуумной камеры на основе ТМН Pfeiffer ATP2300M с экранировкой

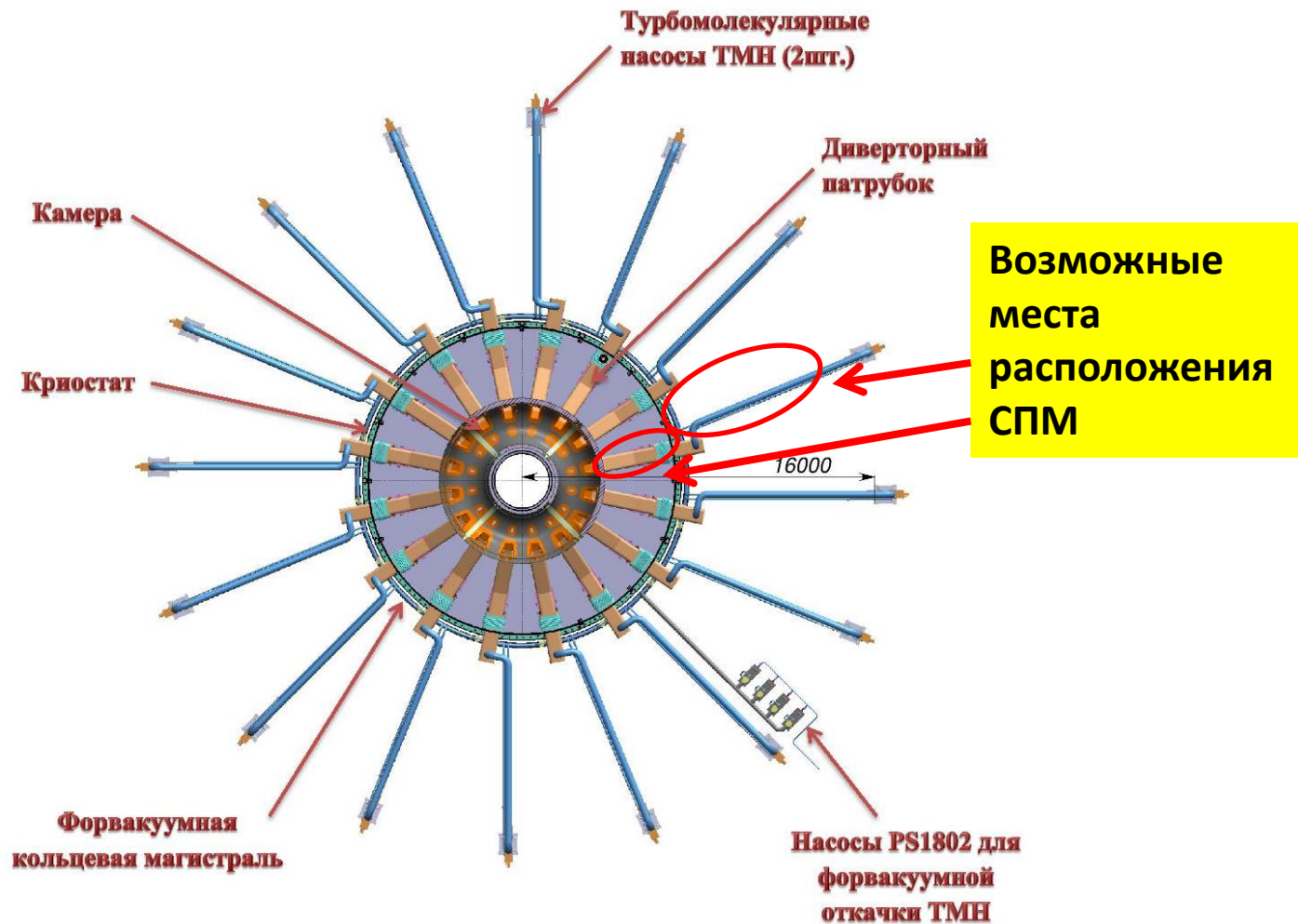


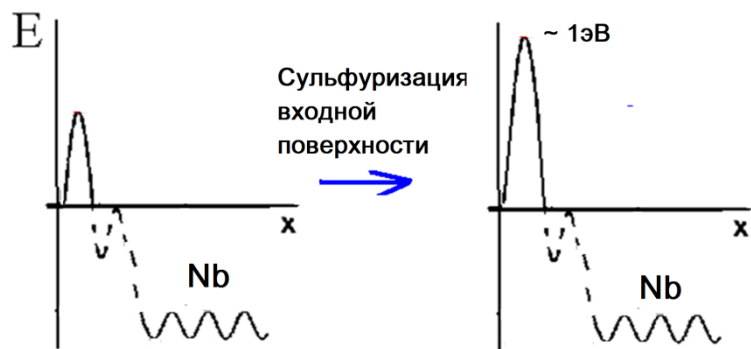
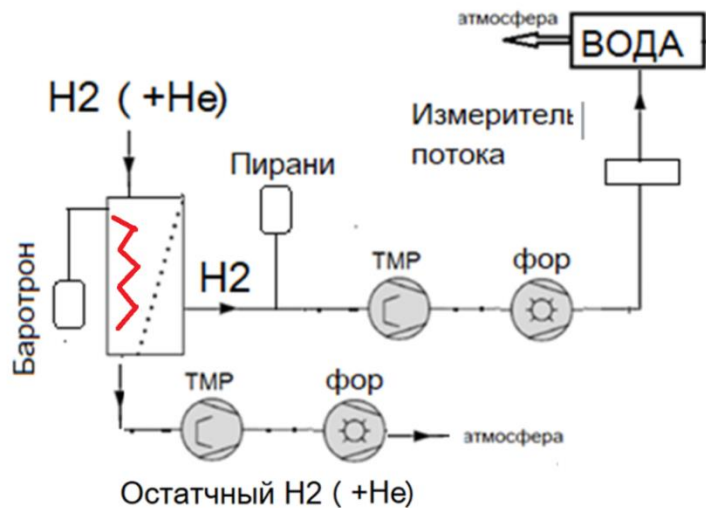
Компоновка СВО вакуумной камеры на основе ТМН Pfeiffer ATP2300M с экранировкой

5 мТл – внутри магнитного экрана (??), а снаружи??



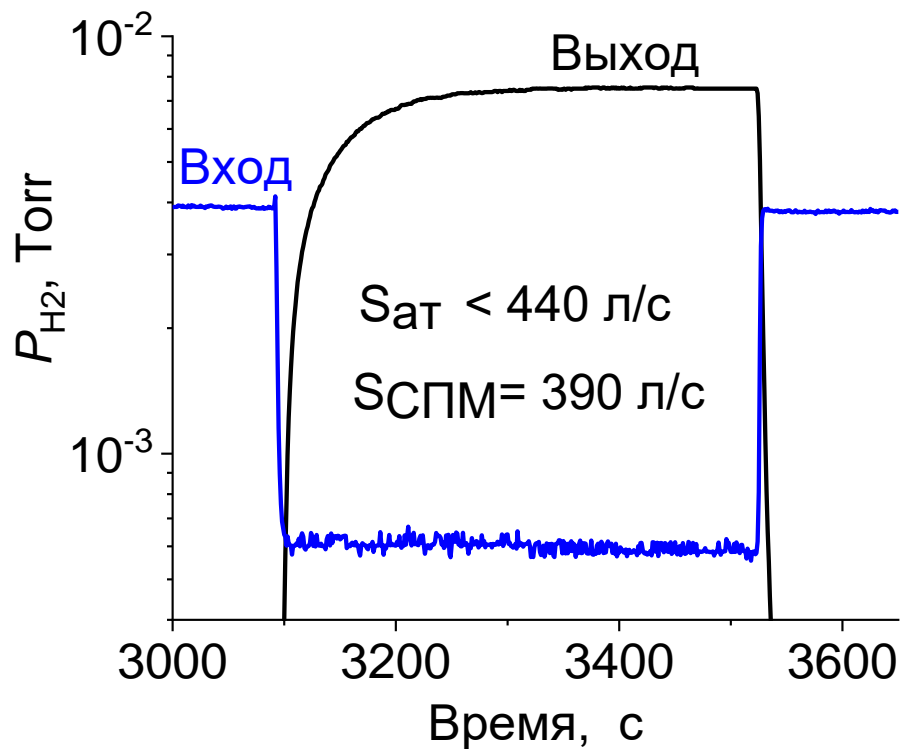
Компоновка СВО вакуумной камеры на основе ТМН Pfeiffer ATP2300M без экранировки





Более 88% генерируемых атомов рекомбинирует на ВЫХОДНОЙ стороне

Площадь атомизатора: 40 см^2
 Скорость диссоциации H_2 : $\leq 440 \text{ л/с}$
 Скорость СПМ-откачки: 390 л/с



Проникает больше 88% генерируемых атомов (!)